

(12) **PARAIŠKOS APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2022 539**
(22) Paraiškos padavimo data: **2022-09-26**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2024-04-10**

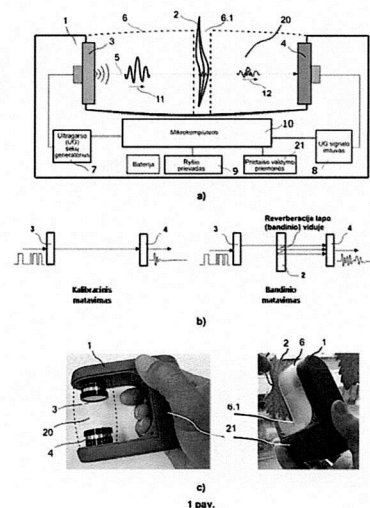
(71) Pareiškėjas:
Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44029 Kaunas, LT
Spanish National Research Council (CSIC), Serrano 144, 28 Madrid, 28006 Madrid, ES
(72) Išradėjas:
Linus SVILAINIS, LT
Andrius CHAZIACHMETOVAS, LT
Arturas ALEKSANDROVAS, LT
Žilvinas NAKUTIS, LT
Valdas EIDUKYNAS, LT
Paulius TERVYDIS, LT
Tomas Enrique Gomez ALVAREZ-ARENAS, ES
Maria Dolores FERNANDEZ-CABALLERO FARINAS, ES
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Otilija KLIMAITIENĖ, 35, AAA Law, A. Goštauto g. 40B, Verslo centras „Dvyniai“, LT-03163 Vilnius, LT

(54) Pavadinimas:

Augalų lapų fiziologinės reakcijos ultragarsinio įvertinimo būdas, prietaisas ir sistema

(57) Referatas:

Šis išradimas priklauso ultragarsinių matavimų ir sistemų sričiai. Jame atskleidžiama: būdas, prietaisas ir sistema, skirti ultragarsu įvertinti augalų lapų (2) fiziologinį atsaką ir jo pokytį dėl aplinkos poveikių, pavyzdžiui, nusakyti augalo drėkinimo trūkumą. Skirtingai nei žinomi sprendimai, naudojantys vieną trumpą plačiajuosčio ultragarso impulsą, šiame išradime panaudoti skleisto spektro signalai, pavyzdžiui, pasirinktos pozicijos ir pločio impulsų skleisto spektro (APWP SS) UG signalai, dažniu moduluotos („chirp“) arba kodinės sekos. Šie signalai leidžia pasiekti pakankamą matavimo SNR, ir įvertinti, ypač praktinio taikymo aplinkybėmis, fiziologines lapų (2) charakteristikas (tokias, kaip santykinis vandens potencialas RWC, turgoro praradimas ir slėgis, vandens potencialas). Išradimas sprendžia atvirkštinį uždavinį laiko srityje, kur ieškomas rezultatas yra lapo (2) modelio parametrų – storio, tankio, UG sklaidimo greičio ir slopinimo – geriausias atitikimas užregistruotam lapo UG matavimo signalui. Išradimas leidžia patikimai matuoti lapų (2) atsaką lauko sąlygomis (pasižyminčiomis temperatūros, drėgmės, slėgio pokyčiais), todėl yra praktiškas naudoti žemės ūkio specialistams ir ūkininkams.



AUGALŲ LAPŲ FIZIOLOGINIO ATSAKO ULTRAGARSINIO ĮVERTINIMO BŪDAS, PRIETAISAS IR SISTEMA

IŠRADIMO SRITIS

Šis išradimas atskleidžia ultragarsinio matavimo būdą, prietaisą ir sistemą, skirtus ultragarsu matuoti augalo lapo fiziologinį atsaką bei jo pokyčius dėl aplinkos poveikių. Išradime naudojami pasirinktos trukmės skleistos spektro ultragarsiniai signalai, leidžiantys šiuose matavimuose pasiekti aukštą signalo-triukšmo santykį (SNR), tuo pačiu, patikimai ir tiksliai įvertinti lapų atsaką (sausros stresas, santykinis vandens kiekis (RWC) ar pan.), taip įgalinant ir supaprastinant matavimus net ir lauko sąlygomis, pavyzdžiui, vynuogyne.

TECHNIKOS LYGIS

Tiesioginis augalo lapų atsako matavimas ar aptikimas (pavyzdžiui, siekiant įvertinti sausros poveikį („sausros stresą“), santykinį vandens kiekį (RWC), vandens potencialą (WP)) yra jau iš anksčiau žinomas, kaip geresnis būdas tinkamai planuoti augalų drėkinimą, palyginus su tradiciniais atmosferinio vandens poreikio arba dirvožemio drėgmės būklės įvertinimais.

Anksčiau paskelbtuose dokumentuose atskleidžiama, kaip ultragarsiniai matavimai gali būti panaudoti lapo fiziologinių parametrų įvertinimui. Tačiau šiuose dokumentuose atskleisti būdai ir prietaisai yra tinkami matuoti lapų atsaką laboratorijos aplinkoje ir sąlygomis. Todėl praktiniu iššūkiu tampa išmatuoti augalų lapų atsaką realiu laiku ir lauko sąlygomis.

Mokslinis straipsnis Álvarez-Arenas et al., Determination of Plant Leaves Water Status using Air-Coupled Ultrasounds, 10.1109 /ULTSYM.2009.0188, [1] atskleidžia, kad vandens kiekis lapuose gali būti įvertinamas, analizuojant storio rezonanso amplitudžių ir fazių spektrus. Šie rezonansai atsiranda ultragarsinių dažnių diapazone panaudojus ultragarsą, generuojamą oro aplinkoje (angl. air-coupled ultrasounds). Nepaisant sudėtingos lapų mikrostruktūros, rezonansus galima aprašyti vienalytės ir izotropinės plokštelės arba keturių sluoksnių kompozito modeliais. Tokio modelio atvirkštinio uždavinio sprendimas leidžia gauti ultragarso greitį ir slopinimą lape, lapo storį, tankį ir storio rezonanso dažnį. Tyrimo rezultatai rodo, kad šie parametrai yra stipriai susiję su lapų mikrostruktūra, vandens kiekiu ir

vandens būsena lape. Kadangi šis būdas yra visiškai bekontaktis ir neinvazinis, jis suteikia unikalią galimybę tirti sudėtingą dinaminę vandens elgseną augaluose ir vandens apykaitą tarp augalo ir atmosferos per augalo lapus.

- Kitame straipsnyje, Fariñas et al. Monitoring plant response to environmental stimuli by ultrasonic sensing of the leaves, *Ultrasound Med Biol.* 2014 Sep;40(9):2183-94. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2014.04.004. Epub 2014 Jul 9 [2] aprašomas būdas, pagrįstas augalų lapų storio rezonansų sužadinimu, registravimu ir spektrine analize, naudojant oru sklindantį plačiajuostį (150–900 kHz) ultragarso impulsą, ir siekiant stebėti lapų savybių pokyčius, kuriuos sukelia skirtingi aplinkos dirgikliai: staigus šviesos intensyvumo pokytis, staigus laistymas po sausros laikotarpio ir paros ciklas. Keturios skirtingos plačiai paplitusios rūšys, turinčios skirtingas lapų savybes (forma, dydis, storis, lygumas, vidinių gyslų struktūra) buvo atrinktos išbandyti šį metodą. Santykinis storio rezonansinis dažnis, per 25–50 minučių po staigaus šviesos intensyvumo sumažėjimo, padidėjo nuo 8% iki 12%.
- 15 Staiga palaisčius, santykinis rezonansinis dažnis per 10-400 minučių padidėjo nuo 5% iki 30%. Paros bėgyje santykinis pokytis buvo nuo 4% iki 10%. Tyrimas atskleidė, kad skirtingos rūšys pasižymi skirtinga lapų atsako svyravimų amplitude, dažniu ir kinetika. Metodas gali būti vienodai taikomas bet kokios rūšies lapams, pasižymintiems storio rezonansu.
- 20 Dar viename straipsnyje Fariñas et al. „Instantaneous and non-destructive relative water content estimation from deep learning applied to resonant ultrasonic spectra of plant leaves“ *Plant Methods* (2019) 15:128 <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0511-z> [3] pateikiamas santykinio vandens kiekio (RWC) augalų lapuose įvertinimo metodas naudojant bekontaktę ultragarso rezonanso spektroskopiją (NC-RUS). Šis būdas leidžia neinvaziniu, neardomuoju ir greitu būdu išmatuoti augalų lapų perdavimo koeficientą [0,15–1,6] MHz dažnių diapazone. Ištirti du skirtingi siūlomo metodo atvirkštinio uždavinio sprendimo metodai: konvoliucinių neuroninių tinklų (CNN) metodas ir atsitiktinio miško (RF) metodas. CNN metodas vertina visą lapo perdavimo koeficiento spektrą, tuo tarpu
- 30 RF metodas naudoja tik keturis išvestinius parametrus, gautus iš perdavimo koeficiento spektro. Abu metodai buvo sėkmingai išbandyti *Viburnum tinus* lapų mėginiuose. Nustatyta, kad Pearsono koreliacija yra tarp 0,92 ir 0,84.

Techninė problema. Aukščiau pateiktuose dokumentuose nurodoma, kad tiriamų augalų lapų parametrų matavimui naudojamas vienas trumpas ultragarso

impulsas. Šio impulso trukmė parenkama pagal ultragarsinio keitiklio centrinį dažnį f_0 kaip $0.5 \times 1/f_0$, kaip nurodyta aukščiau minėtuose dokumentuose. Tačiau žadinimas trumpu impulsu yra itin neefektyvus, nes, siekiant platesnės UG dažnių juostos, impulsas turi būti susiaurinamas, o tai reiškia, kad UG signalas turi mažiau energijos, taigi ir mažesnį SNR. Be to, didžioji dalis žadinančio elektros impulso energijos yra sutelkta apatinėje dažnių diapazono dalyje, ir tik nedidelė impulso energijos dalis praeina per UG keitiklį. Todėl toks pavienis trumpas ultragarso impulsas ne tik praranda energiją sklidimo kelyje, bet ir yra gana jautrus aplinkos poveikiui ir triukšmui, o tai ženkliai pablogina signalo ir triukšmo santykį (SNR) ir matavimų patikimumą. Oru sklindantis ultragarsas pasižymi dideliais energijos nuostoliais dėl itin didelio oro akustinio impedanso skirtumo nuo UG keitiklio ir matuojamo lapo akustinio impedanso. Ultragarsinių keitiklių impedanso suderinimą galima pagerinti naudojant geresnę keitiklio konstrukciją [6], tačiau energijos nuostoliai lape išlieka. Energijos praradimas lape yra ne tik dėl impedanso neatitikimo, bet ir dėl itin didelio ultragarso didelio slopinimo lape. Šie nuostoliai gali siekti 60-100dB. Vienintelis būdas sumažinti šiuos nuostolius yra didinti elektrinių žadinimo impulsų amplitudę, tačiau žadinimo įtampai viršijus 300V kyla didelių saugos, UG keitiklio pažeidimų ir PCB projektavimo problemų. Pažymėtina, kad lapų rezonansas gali įvykti plačiame dažnių diapazone, paprastai 300-1000kHz diapazone. Esamos UG keitiklių technologijos neužtikrina tokio plataus dažnių diapazono. Todėl turi būti naudojami keli skirtingų dažnių diapazonų UG keitikliai [1], [2], [3]. Praktinis iššūkis yra išmatuoti augalų lapų atsaką realiu laiku ir lauko sąlygomis. Nepaisant santykinai plačiajuosčių UG keitiklių naudojimo, sprendimai, aprašyti [1] ir [2], naudojo dvi skirtingų dažnių diapazono keitiklių poras, o sprendimas [3] naudojo net tris keitiklių poras, o perdavimo dažnio atsako dydis ir fazė buvo apjungiami prieš gaunant galutinį sprendimą. Be to, visi minėti sprendimai matavimus vidurkino iki 120 kartų. Toks sprendimas yra būtinas norint gauti aukštą SNR plačiame dažnių diapazone. Tačiau vidurkinimas ir UG keitiklio pakeitimas kitu yra tinkami tik laboratorinėmis sąlygomis. Jei reikalingas nešiojamas ir realaus laiko matavimas, tuomet keisti UG keitiklius nėra tinkama. Be to, stabilią matuojamų lapų padėtį yra sunku išlaikyti esant įvairiems lauko sąlygų trikdžiams (augalo judėjimui, drėgmės, slėgio, temperatūros pokyčiams ir kt.). Prietaisas turi būti patogus ir nesudėtingas naudoti žemės ūkio specialistams ar ūkininkams.

Pavyzdžiui, straipsnis [1] Álvarez-Arenas et al. atskleidžia, kad „UG keitiklį žadina neigiamas pusės periodo trukmės stačiakampis impulsas, suderintas su centriniu keitiklio dažniu“. Taip pat, [3] Fariñas et al. atskleidžia, kad „komercinis impulsų generatorius / imtuvas (5077PR, Olympus, Houston, TX, JAV) buvo naudojamas žadinti UG keitiklį 200V amplitudės pusės periodo trukmės stačiakampiais impulsais, suderintais pagal UG keitiklių centrinių dažnį, bei stiprinti bei filtruoti iš priimančio UG keitiklio gautą elektrinį signalą (stiprinimas iki 40dB ir žemo dažnio filtravimas žemiau 10MHz)". Tas pats trumpas UG impulsas yra nurodytas ir dokumente [2] Fariñas et al.: „(200V amplitudės pusės periodo trukmės stačiakampis impulsas, suderintas su UG keitiklio centriniu dažniu)".

Álvarez-Arenas ir kt. [1] atskleidžia matuojamo augalo lapo rezonanso modelį, kurį sudaro vienas ar daugiau (keturi) skirtingo tankio sluoksnių. Pagal šį modelį, ultragarso signalo perdavimas ir jo vidiniai atspindžiai lapo viduje tampa sudėtingesni, sukeldami rezonansinį (reverberacinį) atsaką, kaip parodyta dokumento [1] 2 ir 3 paveikslėliuose. Šie rezonansai (reverberacijos lapo viduje) yra glaudžiai susiję su lapo vidine mikrostruktūra, vandens kiekiu ir būseną lape. Tačiau šie daugkartiniai atspindėti signalai yra mažos amplitudės, todėl yra dar sunkiau pastebimi ir išskiriami iš triukšmo jeigu matavimui naudojamas tik vienas plačiajuostis ultragarso impulsas.

Problema yra tame, kad ir storis, ir sklaidimo greitis turi būti įvertinti sprendžiant atvirkštinį uždavinį. Tuo tarpu, rezonanso smailės padėtį apsprendžia vėlavimo lape laikas, kuris yra storio ir greičio santykio funkcija. Tačiau greitis taip pat apibrėžia ir akustinį impedansą, kuris savo ruožtu apibrėžia santykį tarp rezonanso smailės ir slėnio. O rezonanso smailės plotį apsprendžia tankis ir slopinimas. Visi paminėti požymiai kartu su fazės dažnine charakteristika leidžia atspėti visus keturis lapo parametrus (storį, tankį, ultragarso sklaidimo greitį ir slopinimą). Vis tik, atvirkštinio uždavinio sprendinio konvergavimo kriterijus nėra aštrus optimumo srityje, todėl storio ir greičio paklaidos jautrumas triukšmui yra didelis.

Todėl, lapų matavimui naudojant vieną trumpą impulsą, neužtikrinamas pakankamas SNR tame dažnių diapazone, kuriame gali atsirasti lapo rezonansai. Be to, atvirkštinio uždavinio sprendimo kokybę nusako ir SNR, ir dažnių diapazonas, kuriame užtikrinamas aukštas SNR. SNR galima pagerinti naudojant kelių matavimų vidurkio skaičiavimą, tačiau taikant vidurkio metodą, reikia stabilų oro ir lapų

būsenos, o tai neįmanomi lauko sąlygomis, bei vidurkio skaičiavimas užima labai daug laiko.

Nėra žinoma metodų, kaip pagerinti augalų lapų atsako matavimų atvirkštinio uždavinio sprendimo kokybę iki patenkinamo arba pasirenkamo lygio. Šis išradimas atskleidžia metodiką, kaip efektyviai išspręsti aukščiau aprašytą problemą.

IŠRADIMO ESME

Techninis sprendimas. Šis išradimas atskleidžia būdą ir sistemą, kuriuose yra panaudojamos pasirenkamos laikinės pozicijos ir pločio (APWP) impulsų sekos, gautos iš netiesinės dažnio moduliacijos skleistos spektro (SS) signalų, taip formuojant ultragarsinius signalus, kuriais būtų galima išmatuoti (įvertinti) augalo lapo atsaką lauko sąlygomis, pavyzdžiui, vynuogyne.

Tokio jutiklio (1) aparatinės įrangos konfigūracija ir išorinis vaizdas gali atrodyti panašiai, kaip aprašyta aktualiuose ankstesnio technikos dokumentuose [2], [3], tačiau šis jutiklis (1) turi turėti specifinių savybių: specialią impulsų sekų generavimo elektroniką, gebančią generuoti ilgas APWP sekas, bei būti kompaktiško dydžio, tinkamo neštis ir atlikti lapų matavimus lauko sąlygomis.

Tuo tarpu, šiame išradime nauja savybė yra tai, kad vieno plačiajuosčio impulso signalas pakeičiamas ženkliai ilgesniais pasirenkamos laikinės pozicijos ir pločio (APWP) sekų skleistos spektro (SS) signalais, kurie yra aprašyti dokumente [4] Svilainis et al. Ultrasound Transmission Spectral Compensation Using Arbitrary Position and Width Pulse Sets, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, March 2018, DOI: 10.1109/TIM.2018.2809838. Ilgesni SS signalai geriau perdengia reikalingą dažnių juostą ir užtikrina geresnį signalo-triukšmo santykį (SNR). Tačiau to gali nepakakti, norint gauti patikimą matavimą. Problema yra ta, kad tiek keitiklių perdavimo dažninė charakteristika tiek triukšmo spektras yra netolygūs. Todėl APWP SS signalo spektro forma yra specialiai valdoma, siekiant kompensuoti SNR sumažėjimą ties tais dažniais, kur atsiranda spektro komponentų nuostoliai (pavyzdžiui, UG keitiklių pralaidumo juostos kraštuose, [4] 1 pav. ir 4 pav.), arba kur išauga triukšmas.

Siekiant atskirti šio išradimo naujumą nuo ankstesnių technikos lygio dokumentų [1], [2], [3], galima laikyti, kad siunčiami APWP SS ultragarsiniai signalai ([4] 12 pav. ir 13 pav.) yra sužadinami ne vieno, bet kelių aukštos įtampos (high-voltage, HV) impulsų sekomis. Be to, tokia HV impulsų seka yra pasirinktinai

sukonfigūruojama iš tokio HV impulsų skaičiaus, jų laikinių pozicijų ir impulsų pločių, kad sugeneruotas UG signalas užtikrintų geresnį SNR, kurio pakaktų numatytiems ultragarsiniams matavimams.

5 APWP SS signalas gali būti sukonfigūruotas ir kaip dažniu moduluotas harmoninis virpesys, žinomas kaip "chirp" signalas. Šio išradimo apimtyje, nėra taikomi apribojimai kodinių sekų tipui, išskyrus tai, kad seka turi būti tinkama sukurti pakankamai didelį priimto ultragarsinio (UG) signalo SNR reikiamoje dažnių juostoje, kas užtikrintų patikimą lapų atsako savybių matavimą.

10 Lapų rezonanso spektroskopijos uždaviniuose svarbus skirtumas nuo dokumento [4] yra tai, kad atstumas tarp UG keitiklių negali būti didelis dėl dviejų priežasčių: i) matavimui naudojamo ultragarso bangos frontas turi būti plokščias, tai yra, lapas turi būti matuojamas artimajame UG keitiklio lauke ir ii) lapo UG matavimo prietaisas turi būti mažas, todėl padidinus atstumą tarp UG keitiklių, padidėtų prietaiso dydis. Todėl siunčiamų UG SS signalų trukmę riboja minėtas nedidelis
15 atstumas tarp UG keitiklių, nes ilgi SS signalai persidengs vienas su kitu dėl mažo sklaidimo atstumo.

Todėl, išradimo apimtyje išaiškėja dar vienos naujos savybės poreikis - siekiant išspręsti lapui specifinio ultragarsinio atsako įvertinimo iš gautų UG signalų atvirkštinį uždavinį - turi būti naudojamas specifinis, tokiam persidengimui atsparus,
20 daug skaičiavimų reikalaujantis signalų apdorojimas. Tokiu būdu išsprendžiama ilgų SS signalų kelių atspindžių persidengimo problema.

Taip pat, šio išradimo metodas apima lapo modelio naudojimą, pavyzdžiui, viensluksnį arba daugiasluksnį lapo modelį, aprašytą [1] Álvarez-Arenas et al. 2 pav. Skirtingai nuo [1], šiame išradime lapo modelis yra papildytas iki pilno sklaidimo
25 skaitmeninio modelio, apimančio ne tik vieno sluoksnio lapą, aprašytą storio, tankio ir standumo parametrais, bet ir sklindančio UG signalo vėlinimą, reverberaciją dėl daugkartinių atspindžių tarp lapo ir UG keitiklių. Naudojant realiai išmatuotą kalibracinį signalą (be lapo tarp keitiklių), sumodeliuojamas bandinio signalas (su lapu (2) tarp keitiklių). Atvirkštinis uždavinys sprendžiamas ieškant geriausio
30 atitikimo tarp realiai išmatuoto ir sumodeliuoto bandinio signalų laiko srityje, koreguojant pilno sklaidimo modelio parametrus.

Taip pat, šis modelis apima ir aplinkos parametrus, tokius kaip oro tankis, temperatūra ir ultragarso sklaidimo greitis. Nors laboratorinėmis sąlygomis šie parametrai yra stabilūs, tačiau lauko sąlygomis jie gali kisti. Šie parametrai iš

pradžių apskaičiuojami naudojant kalibracinį signalą. Galutinis šių parametru paderinimas atliekamas, pritaikant juos pagal pilną sklidimo skaitmeninį modelį. Taip pat, iš anksto išmatuojamas elektronikos perdavimo funkcijos skirtumas kalibracinio ir bandinio matavimo atveju. Kiekvienas naujas kalibracinis ir bandinio signalas kompensuojamas, siekiant šią įtaką eliminuoti. Atvirkštinio uždavinio sprendimo rezultate galutinai pakoreguotas lapo storis, tankis ir UG sklidimo greičio bei slopinimo parametrai naudojami kaip matavimo rezultatas.

Metodui įgyvendinti, tinkamiausią sistemos realizavimo variantą sudaro šie komponentai:

- 10 • kompaktiškas nešiojamas prietaisas, skirtas augalų lapų ultragarsinio atsako nustatymui;
- mobilusis įrenginys, pvz., išmanusis telefonas, veikiantis kaip išėjimo į kompiuterinį debesį terminalas, užtikrinantis belaidį („Bluetooth“) ryšį su minėtu augalo lapo matavimo prietaisu, papildomai pridedantis geografinės vietos informaciją, nuotraukas, etiketes ir RF žymų informaciją prie užregistruotų lapo UG matavimo duomenų, kuriuos perduoda belaidžiu ryšiu (WiFi arba mobilaus ryšio), toliau apdoroti kompiuteriniame debesyje;
- 15 • kompiuterių debesijos arba serverio infrastruktūros paslauga, skirta signalų apdorojimui ir atvirkštinio uždavinio sprendimui, duomenų saugojimui ir ataskaitų pateikimui, naudojant interneto arba žiniatinklio paslaugas tekstiniu arba grafiniu formatu.

Efektai. Šis išradimas leidžia padidinti signalo-triukšmo santykį (SNR) ultragarsiniuose matavimuose, skirtuose gauti ir įvertinti augalo lapų ultragarsinį atsaką (susijusį su tam tikrais žinomais augalo lapo fiziologiniais parametrais, tokiais kaip RWC, WP, turgoras, ir kitais). Taip pat, išradimas leidžia efektyviau (sparčiau ir tiksliau) įvertinti augalų lapų atsaką, veikiant nepalankiems aplinkos veiksniams, pavyzdžiui, matuojant lapo atsaką realiomis lauko sąlygomis.

BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

Išradimas yra paaiškintas brėžiniuose. Brėžiniai pateikiami kaip nuoroda į galimus įgyvendinimo variantus ir nėra skirti apriboti išradimo apimtį. Brėžiniai ir diagramos nebūtinai atitinka išradimo detalių mastelį. Smulkmenos, kurios nėra svarbios ir nėra būtinos išradimui paaiškinti, brėžiniuose nepateiktos.

1 pav. Ultragarsinio lapų jutiklio konfigūracija šiame išradime:

- (a) Įrenginio konfigūracija: 1 – lapų jutiklis, prietaisas; 2 – matuojamas lapas; 3 – ultragarso keitiklis-siūstuvas; 4 – ultragarsinis keitiklis-imituvas; 5 – ultragarsinio signalo sklidimo kelias; 6 – priemonės įstatyti lapą įrenginyje (1), iš anksto numatytoje padėtyje tarp siunčiančio ir priimančio US keitiklių (4, 5); 7 – UG elektrinių impulsų sekų generatorius; 8 – UG signalo imtuvas; 9 – ryšių prievadas; 10 – mikrokompiuteris; 11 – sklindantis UG impulsas; 12 – perduotas US impulsas, praėjęs lapą (2); 20 – cilindro arba statinės formos ultragarsinio matavimo kanalas, kurio galuose yra US keitikliai 4, 5; 21 – įrenginio lokalaus valdymo priemonių blokas (pavyzdžiui, mygtukai, LED indikatoriai, valdymas balsu ir kiti.).
- (b) Ultragarsinėje rezonanso spektroskopijoje naudojami matavimo režimai: kalibracinis režimas (kairėje) – kuomet UG signalas sklinda tarp dviejų UG keitiklių (3 ir 4) be lapo tarp jų; bandinio režimas (dešinėje) – kuomet matavimas atliekamas su lapu (bandiniu) (2) tarp UG keitiklių (3 ir 4). UG signalą, perduodamą per lapą (2), įtakoja lapo storis, tankis, UG sklidimo greitis ir lapo slopinimas (todėl sąlygoja perduoto UG signalo vėlavimą ir reverberaciją);
- (c) lapų atsako ultragarsinio matavimo realaus prietaiso (1) išorinis vaizdas.

2 pav. Ultragarsiniai signalai, jų tipai ir charakteristikos:

- (a) sužadinimas vienu impulsu yra labai neefektyvus, nes impulsą reikia siaurinti, kad būtų pasiekta platesnė UG signalo dažnių juosta, o tai reiškia, kad panaudojama mažiau žadinančio impulso energijos ir gaunamas mažesnis signalo-triukšmo santykis SNR. Impulso didžioji energijos dalis yra sutelkta žemų dažnių srityje, ir tik likusi (mažesnė) energijos dalis atitinka ultragarsinio keitiklio dažnių juostos plotį;
- (b) žadinant skleistą spektro (SS) UG signalu, kurio dažnis moduluojamas tiesiškai (LFM), spektrą galima valdyti taip, kad jis atitiktų UG keitiklio pralaidumo juostą, o jo energija yra didesnė; todėl priimto signalo SNR yra didesnis negu pavienio impulso. Tačiau, priimto signalo spektrinė charakteristika nėra plokščia (tai yra, netolygi plačiame dažnių diapazone);
- (c) triukšmo spektras taip pat nėra plokščias (tai yra, netolygus plačiame dažnių diapazone) dėl ultragarsinio keitiklio kompleksinės varžos ir imtuvo jėgimo srovės triukšmo sąveikos, kaip paaiškinta technikos lygio dokumentuose [7] ir [8];

(d) triukšmo spektrą ir keitiklių perdavimo funkciją galima išmatuoti iš anksto; tada siunčiamo APWP signalo spektrą (kairėje) galima priderinti taip, kad būtų kompensuojami nuostoliai ir triukšmas, pavyzdžiui, juostos pločio kraštuose; tokiu atveju priimto signalo SNR (dešinėje) gaunamas aukštas platesniame dažnių ruože palyginus su impulso; aukštas SNR gaunamas ir už pralaidos juostos;

(e) tiesinės dažnio moduliacijos (LFM)-tipo plačiajuostis signalas; signalo ilgis žymiai sumažintas, kad būtų parodytos individualios impulsų savybės;

(f) nuostolius kompensuojantis APWP-tipo signalas; signalo ilgis žymiai sumažintas, kad būtų parodytos individualios impulsų savybės;

3 pav. Lapo perduodamo atsako pavyzdys dažnių srityje, parodantis, kad gero signalo-triukšmo santykio SNR nepakanka tik rezonanso smailės srityje; skirtingi lapų parametrai įtakoja skirtingas atsako spektro savybes; kuo platesnis dažnių diapazonas su aukštu signalo-triukšmo santykiu SNR, tuo geresnė gaunama lapų parametrų įvertinimo kokybė.

4 pav. Visas signalo sklidimo kelias bandinio režime, apimantis:
 S1: pagrindinį matavimo signalą,
 S2: signalą, sklindantį per lapą (2) ir atsispindintį nuo priimančiojo keitiklio (4), ir atsispindintį nuo lapo (2),
 S3: signalą atsispindėjusį nuo lapo (2), atsispindėjusį nuo perduodančio keitiklio (3), ir sklindantį per lapą (2), ir
 S4: signalą, atsispindėjusį tarp keitiklių (3 ir 4) ir sklidusį per lapą (2) - 3 kartus.

5 pav. Išmatuoto bandinio signalo pavyzdys (su įdėtu į prietaisą matuojamu lapu), kai yra naudojamas ilgas skleistos-spektro signalas (kairėje), parodantis, kad ilgiems SS signalams iškirpti naudoti langą nėra galimybės; todėl nebegaunama rezonansinės smailės (dešinėje) ir todėl nepavyksta gautam signalui priderinti sprendinio parametrus.

6 pav. Kalibracinio signalo pavyzdys (su neįdėtu lapu), parodantis pagrindinį matavimo signalą C1, sklindantį tarp keitiklių (3 ir 4) vieną kartą, ir antrą atspindžio signalą C2, sklindantį tarp keitiklių (3 ir 4) - 3 kartus; todėl C2 laiko poslinkis (sklidimo laikas, angl. *time-of-flight: ToF*) signalo C1 atžvilgiu suteikia informaciją apie ultragarso sklidimo ore greitį.

- 7 pav.** Vėlavimo skirtumo stiprintuve pavyzdys, nustatytas palyginus kalibraciniam ir bandinio matavimams naudotus stiprintuvus; šį skirtumą nulemia stiprintuvų, naudojamų kalibravimo ir bandinio režimuose, fazės dažnių charakteristikų skirtumai.
- 5 **8 pav.** Vėlavimo, atsirandančio dėl skirtingos žadinimo įtampos, pavyzdys; šį skirtumą lemia UG sekų generatoriaus signalo augimo greitis (slew rate); jei kalibracinio ir bandinio režimams yra naudojama skirtinga žadinimo įtampa, šie signalai papildomai vėluoja.
- 10 **9 pav.** Konceptinė schema, parodanti, kaip atliekamas signalų apdorojimas, skirtas gauti lapą apibūdinančius parametrus.
- 15 **10 pav.** Apsauginis gaubtas (6), suteikiantis ultragarsinio matavimo kanalo (20) erdvei (20) cilindro arba statinės formą („S“-kanalas), kuri padeda slopinti oro mikrosrautus (mikrosūkurius) (20.1), atsirandančius tuo metu, kai lapas (2) dedamas į matavimo tarpelį (6.1) arba išimamas iš jo; Ankstesniuose technikos lygio dokumentuose naudotas „U“ formos gaubtas („U“-kanalas), kuriame susidaro dideli oro sūkuriai (20.1); tuo tarpu, naujasis gaubtas, dėl cilindro arba statinės formos, suskaido oro sūkurius į mažesnius (20.1), taip UG matavimo kanale (20) stabilizuoja oro būseną, bei sąlygoja greitesnį jos nusistovėjimą.
- 20 **11 pav.** Operacinių veiksmų sekos diagrama, skirta gauti matuojamo lapo (2) parametrus, kur nuo 3,1 iki 3,24 yra pavaizduoti detalūs lapo atsako įvertinimo būdo žingsniai;
- 25 **12 pav.** Tinkamiausias sistemos įgyvendinimo variantas, apimantis mažiausiai:
- 30 1 – prietaisas aptikti augalo lapų (2) atsaką ultragarsiniais signalais (ultragarsinis lapo atsako jutiklis); 12 – mobilusis įrenginys, užtikrinantis belaidį ryšį, pavyzdžiui, Bluetooth, WiFi arba mobilųjį ryšį, pavyzdžiui, išorinis išmanusis įrenginys su taikomąja programėle, fiksuojančia matavimų geolokaciją, bei lapo parametrų matavimo laiką, 13 – debesų kompiuterijos ištekliai ir paslaugos, skirtos įgyvendinti skaitmeninį matavimo signalų apdorojimą ir atvirkštinio uždavinio sprendimą laiko srityje, bei suskaičiuoti lapų atsako įvertinimo rezultatus; skaičiuojamos ir vykdomos funkcijos: inversinė problema, ataskaitos vartotojui, geografiniai žemėlapiai ir plotai.

DETALUS IŠRADIMO APRAŠYMAS

Šis išradimas atskleidžia, kaip įgyvendinti lapų atsako aptikimą ir įvertinimą ultragarsinių matavimų būdais, kaip aprašyta dokumentuose [1], [2], [3], ir panaudojant APWP SS signalus, aprašytus dokumente [4], Svilainis et al.

5 „Ultrasound Transmission Spectral Compensation Using Arbitrary Position and Width Pulse Sets“, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, March 2018, DOI: 10.1109/TIM.2018.2809838.

Dar vienas ankstesnio technikos lygio dokumentas [5] atskleidžia augalų lapų atsako matavimo metodą ir sistemą. Ten atvirkštinio uždavinio konvergavimo

10 valdymui pasiūlytas Particle Swarm Optimization (PSO) metodas, o ne stochastinio gradiento nuolydžio su momento (SGDM) optimizatoriumi metodas, kuris buvo naudotas ankstesniuose sprendimuose bei atskleistas [1], [2], [3] dokumentuose. PSO metodas leidžia išvengti vietinių minimumų, ieškodamas atvirkštinio uždavinio sprendinio.

15 Šio išradimo pranašumai, palyginus su [1], [2], [3], ir [5] sprendimais, yra gaunami pagal šiuos požymius ir savybes:

1. Išmatuoto UG signalo atitikimas lapo modeliui (konvergavimo kriterijaus skaičiavimas) vykdomas laiko, o ne dažnių srityje, taip išvengiama poreikio skaičiuoti vien tik S1 signalo spektrą (4 pav.); dėl trukdančių daugkartinių

20 atspindžių, nėra galimybės S2 ir S3 signalus (tarp lapo ir keitiklių, 4 pav.) atskirti nuo signalo S1 naudojant langą; be to, lango dydžio ir padėties parinkimas (dažniausiai, tai lango funkcija, 5 pav., kairėje) reikalauja kruopštaus išmatuoto UG signalo struktūros tyrimo, ir kartais gali nepavykti, to rezultate gaunamas iškreiptas spektrinis atsakas (5 pav.); paprastai atliekamas rankiniu būdu, o tai

25 nepriimtina, jeigu matavimo apdorojimas turi būti nepriklausomas nuo naudojamo signalo.

2. Tačiau, 1-oji ypatybė (konvergencijos kriterijų skaičiavimas laiko srityje) nėra pakankama, jeigu tikimasi signalų reikšmingo persidengimo (5 pav.). Todėl, šiame išradime yra sukurtas pilnas UG signalų sklidimo modelis, apimantis

30 signalų S2, S3 (lapo-keitiklio reverberacija, 4 pav.) ir S4 (keitiklio-keitiklio reverberacija, 4 pav.) modeliavimo būdą. Tada signalai S2, S3 ir S4 yra atimami iš etaloninio signalo, tam, kad atskirti signalą S1. Svarbu pažymėti tai, kad atspindžių signalai S2, S3 ir S4 taip pat teikia informaciją apie matuojamo

augalo lapo ir jo aplinkos oro parametrus. Dokumentuose [1], [2], [3] ir [5] šiuos signalus stengiamasi atmesti naudojant langą, tuo tarpu, šis išradimas naudoja šiuos atspindžių signalus kaip papildomą informacijos šaltinį, reikalingą įvertinti tiriamojo lapo parametrus.

- 5 **3.** Dėl temperatūros ir slėgio pokyčių, lauko sąlygomis (pavyzdžiui, vynuogyne) oro tankis ir ultragarso sklidimo greitis bus skirtingas nuo normalių (tikėtinų laboratorijoje). Dokumente [5] parodyta, kad jeigu nepaisoma oro parametrų pokyčių, lapų storio paklaidos gali siekti iki 3,6%, lapų tankio paklaidos iki 15% ir ultragarso greičio lape paklaidos iki 6,8%. Tačiau [5] tik teoriškai pasvarstyta, kad šias klaidas galima ištaisyti matuojant ultragarso greitį ore ir slėgį arba temperatūrą ir slėgį, tačiau nepaisant to, sprendimas nebuvo įgyvendintas. Net ir panaudojus temperatūros jutiklį, jutiklio registruojama temperatūra atsiliks nuo faktinės oro temperatūros. Šiame išradime naujumas yra tai, kad ultragarso greitis ore matuojamas pagal kalibracinio matavimo signalus C1 ir C2 (6 pav.).
- 10 Signalas C1 tarp UG keitiklių sklinda vieną kartą (1b pav. kairėje, ir 6 pav.). Signalas C2 tarp keitiklių sklinda tris kartus (6 pav.). Todėl, atsižvelgiant į atstumą d tarp UG keitiklių, kuris žinomas iš lapų jutiklio konstrukcijos, signalo C2 laiko poslinkis (sklidimo laikas, ToF) signalo C1 atžvilgiu teikia informaciją apie ultragarso sklidimo ore greitį. Oro greitis gali būti įvertintas kaip $v=2d/ToF$.
- 15 Turint oro greitį, galima įvertinti ir oro temperatūrą, kurių tarpusavio ryšys yra žinomas. Toliau, temperatūra gali būti naudojama oro tankiui įvertinti.
- 20 **4.** Elektronikos įtakos (stiprintuvų dažninių charakteristikų skirtumo, 7 pav. ir žadinimo įtampos įtakos vėlinimui, 8 pav.) kompensavimas pagerina atvirkštinio uždavinio sprendimo tikslumą. Lapo parametrai įvertinami ir pagal reverberacijos lape rezonansų padėtį ir pagal absoliutinį vėlinimą. Jeigu elektronikos įtaka signalo vėlinimui lieka neįvertinta, tuomet šis vėlinimas turės būti įtrauktas į modelio parametrus. Tai sukels lapo storio ir kitų susijusių parametrų vertinimo paklaidas.
- 25 **5.** Specialaus tipo žadinimo signalų (APWP, 2 pav. f) taikymas SNR kompensacijai už pralaidos juostos ribų praplečia matavimams tinkamą dažnių diapazoną (2 pav. d). Signalų dažnių diapazonas nusako išmatuojamą lapo storių diapazoną, todėl išmatuojamas lapo storių diapazonas gali būti išplečiamas, išplėtus dažnių diapazoną. Tiek lapų storis, tiek ultragarso sklidimo lape greitis apibrėžia signalo vėlavimą ir rezonanso smailių padėtį. Ultragarso greitis lape taip pat apibrėžia
- 30

- lapo akustinę varžą, kuri atitinkamai apibrėžia santykį tarp rezonanso smailės ir jos žemutinio pagrindo (3 pav.). Visi šie įverčiai kartu, įskaitant lapų perdavimo fazinę charakteristiką ir rezonanso smailės plotį, apibrėžia visus keturis lapų parametrus (storį, tankį, ultragarso sklaidimo greitį ir slopinimą). Tačiau, bet kokie atvirkštinio uždavinio konvergencijos kriterijai nėra aštrūs dėl storio ir greičio abipusės įtakos vėlavimui: nors vėlavimo sprendimas gali būti tikslus, tačiau gali būti didelių storio ir greičio nuokrypių. Todėl labai svarbu, kad pakankamai didelis SNR būtų teikiamas kuo platesniame dažnių diapazone ir kad SNR būtų vienodas tiriamame dažnių diapazone. Negerai, kad kompleksinės UG keitiklio varžos sąveika su stiprintuvo srovės triukšmo šaltiniu sukuria netolygų jėgimo triukšmą (2c pav.). Žadinimo signalo spektras turi tai kompensuoti, suteikiant daugiau žadinimo energijos tiems dažnio komponentams kuriuose triukšmo lygis aukštas, ir mažiau tiems, kuriuose triukšmo lygis yra žemas (2 pav. d).
6. Valdomos žadinimo įtampos ir keičiamo priėmimo stiprinimo naudojimas, signalo nuostolių prasme, leidžia atlikti matavimus platesniame lapo savybių diapazone. Nors lapo storis gali būti vienodas, signalo nuostoliai (dėl signalo slopinimo ir impedansų nesuderinamumo) lape gali labai skirtis. Tai reiškia, jeigu keičiamas tik stiprinimas, o žadinimo įtampa paliekama pastovi, tada kalibravimo matavimui gali prireikti imtuve susilpninti signalą, o lapo matavimui reikės didelio stiprinimo, tuomet signalo-triukšmo-santykis SNR bus labai žemas. Todėl, keičiama UG keitiklio žadinimo įtampa kartu su priimamo signalo kintamu stiprinimu išsprendžia šią problemą.
7. Specialios formos apsauginis gaubtas 6 (10 paveiksle kairėje) ultragarso sklaidimo kanalui tarp UG keitiklių 3, 4 užtikrina augalo lapo 2 statmenumą ultragarso sklaidimo keliui 5 ir sumažina ultragarso sklaidimo kelyje oro mikrosrautus, kurie susidaro įterpiant lapą į jutiklį. Tuo tarpu, U-formos apsauginis gaubtas, naudotas ankstesniame straipsnyje [2] (4 paveiksle), leidžia susidaryti dideliems sūkuriams (10 paveiksle dešinėje). Šiame išradime pasiūlytas statinaitės formos UG kanalas suskaido susidariusius oro sūkurius į mažesnius, kurie po to išnyksta greičiau. Nors laboratorinėmis sąlygomis oro mikrosrauto nusistovėjimo laikas nėra svarbus (nes yra priimtinas ilgas mikrosrautų nusistovėjimo laikas), tačiau matuojant lapą lauko ir praktinio naudojimo sąlygomis - reikalingas trumpesnis matavimo laikas, įskaitant ir oro mikrosrauto nusistovėjimo laiką.

8. Įdiegtas pilnas matavimų automatizavimas: vartotojas neprivalo pasirinkti ir konfigūruoti (rankiniu būdu) UG signalo parametrus (žadinimo įtampą, įrašo ilgį, priėmimo stiprinimą, ir kitus), laiko langų pozicijas, bei tikrinti gaunamą lapo perdavimo atsaką: sistema visa tai atlieka adaptyviai ir automatiškai.

5 **Lapo jutiklio prietaisas.** Ultragarsinio lapų jutiklio prietaiso (1) schema pateikta 1a paveiksle. Prietaisas apima, mažiausiai: ultragarsinius keitiklius - siųstuvą ir imtuvą (3, 4), kurie apibrėžia matavimo (arba signalo sklidimo) kelią (5), o tiriamas augalo lapas (2) yra įkišamas į specialų tarpelį 6.1 tarp UG keitiklių. Kiti prietaisą (1) sudarantys komponentai yra šie:

10 6 – priemonė fiksuoti lapą iš anksto numatytoje padėtyje, atliekanti nuo išorinių oro srautų apsaugančio gaubto funkciją, taip pat, realizuojanti cilindro ar statinaitės formos ultragarsinio matavimo kanalą 20, bei turinti minėtą tarpelį 6.1 tiriamam augalo lapui įdėti;

7 – ultragarsinių impulsų sekų generatorius;

15 8 – ultragarsinio signalo imtuvas;

9 – ryšių prievadas;

10 – mikrokompiuteris;

11 – išspinduliuotas ultragarso impulsas;

12 – ultragarso impulsas, praėjęs lapą (2);

20 21 – įrenginio vietinės valdymo priemonės (pavyzdžiui, mygtukai, LED indikatoriai, ar kiti.).

Kompaktiškas ir nešiojamas lapų jutiklis (1), skirtas augalų lapų atsakui pagal šį išradimą užregistruoti, yra parodytas 1c paveiksle.

25 **Signalai.** Signalai augalų lapų parametrams įvertinti yra registruojami atliekant ultragarsinį matavimą šiais dviem režimais:

- be augalo lapo, tai yra, „kalibracinis“ matavimas arba režimas (parodytas 1 b paveiksle, kairėje, ir 6 paveiksle);
- su augalo lapu (2), įkištu į lapo įdėklą (6.1) tarp ultragarsinių keitiklių (3, 4) - tai yra realaus lapo ("bandinio") matavimas (1b paveiksle dešinėje, ir 4 paveiksle).

30

Gautam "kalibraciniam" signalui įtaką daro tik UG signalo generavimo elektronika, siunčiantis UG keitiklis, oro savybės, priėmimo UG keitiklis ir priėmimo elektronika (C1 6 pav.). Gautas "bandinio" signalas, kuris praėjo per lapą (S1 4 pav.), prie aukščiau minėtų „kalibracinio“ signalo efektų, papildomai apima

informaciją apie matuojamo lapo storį, tankį, ultragarso sklaidimo greitį bei slopinimą lape. Signalų sklaidimas per augalo lapą papildomai pavėlina signalą, o daugybė atspindžių lapo viduje sukelia reverberaciją, kurie kartu sudaro specifinį laikinį ir spektrinį atsaką, kaip lapo matavimo rezultatą.

5 Kalibracinis ir bandinio signalai yra gaunami esant nustatytiems skirtingiems stiprinimo ir žadinimo įtampos parametrams. Prieš pradėdant tolesnį signalų apdorojimą, šie signalai turi būti kompensuoti dėl jų skirtumų. Bet kuris lapo matavimo signalas arba kalibravimo signalas yra praleidžiamas per kompensacinį filtrą, kurio amplitudės ir fazės charakteristika atitinka elektronikos skirtumus.

10 Skleisto spektro ultragarsinių signalų (SS UG), tinkamų šiam išradimui, formavimas yra išdėstytas Svilainis et al. [4] straipsnyje, atskleidžiančiame APWP SS signalų formavimo metodiką. APWP SS signalai yra naudojami tarp dviejų ultragarsinių keitiklių (3, 4), nuo siųstuvo (3) iki imtuvo (4). Tokių APWP SS signalų, gautų kalibravimo režimu, spektrinių charakteristikų pavyzdys parodytas 2b ir 2d
15 paveiksluose. Tokių APWP SS signalų (prieš siuntimą) laiko srityje pavyzdys parodytas 2e ir 2f paveiksluose.

Šiame išradime, laisvai pasirenkamu būdu atitinkamai pailginti skleisto spektro SS signalai yra naudojami matuoti lapo atsako charakteristikas. Augalo lapo (2) vidutinis storis yra 0,15–0,4 mm, todėl dominantis dažnių diapazonas yra 0,3–1 MHz
20 intervale [1], [2], [3]. Optimali ultragarsinio keitiklio centrinio dažnio f_0 impulso trukmė gali būti apskaičiuota kaip $0.5/f_0$ arba 500–1600 ns diapazonas. Tokio trumpo ir ribotos amplitudės UG impulso matavimo signalo-triukšmo santykis SNR šiame taikymo uždavinyje yra žemas ir dažniausiai nepakankamas (2a paveiksle). Todėl turi būti naudojami keli skirtingo dažnio keitikliai ir signalų vidurkinimas, kaip
25 aprašyta [1], [2], [3].

Didesnis SNR galėtų būti pasiekiamas naudojant daug ilgesnės trukmės UG SS signalus. Tačiau, skirtingai nei aprašyta dokumente [4], čia atstumas tarp UG keitiklių negali būti didelis, tam, kad iš UG keitiklio-siųstuvo sklindančios UG bangos frontas būtų plokščias, o lapų jutiklio įrenginio dydis būtų mažas. Ilgi SS signalai
30 persidengs dėl trumpo UG matavimo kanalo atstumo, todėl signalų pasirenkamą trukmę riboja atstumas tarp UG keitiklių (3, 4). Tai reiškia, kad tarp UG keitiklio (3, 4) ir lapo (2), bei UG keitiklio (3) ir UG keitiklio (4) (signalai S2, S3 ir S4 pateikti 4 paveiksle) ultragarso sklaidimo kelyje (5) susidarys daug atspindžių ir jie gali persidengti. Reikia pažymėti, kad kalibraciniame signale taip pat yra daug atspindžių

tarp keitiklių (C2 6 pav.). Tačiau šiame išradime daroma prielaida, kad šie trukdantys atspindžiai signaluose S2, S3, S4 ir C2 taip pat suteikia informaciją apie tiriamo lapo ir oro parametrus. Taigi, užuot nevertinus šių atspindžių, kaip yra [1], [2], [3] arba [5] dokumentuose, šiame išradime jie yra išnaudojami naudingai, gauti tikslesnį lapo atsako įvertį. Konceptinė signalų apdorojimo struktūra, naudojama lapo parametrams įvertinti, pateikiama 9 paveiksle.

Tam, kad iš matavimo signalų išgauti naudingą informaciją apie išmatuotą augalo lapą, reikia atskirti signalus S1, S2, S3 ir S4. Tai daroma sprendžiant atvirkštinį uždavinį. Norint sukurti atvirkštinio uždavinio sprendimo įvertinimo algoritmą, reikalingi signalo sklidimo modeliai.

Signalų sklidimo per lapą modelis. Sumodeliuotas „bandinio“ signalas gaunamas modeliuojant kalibracinio signalo sklidimą per lapą (su kintamais lapo parametrais: storium, tankiu, UG sklidimo greičiu ir slopinimu; ir pastoviais oro parametrais: UG sklidimo greičiu ir tankiu) ir modeliuojant UG signalo atspindį nuo lapo (su kintamais lapų parametrais: storium, tankiu, UG sklidimo greičiu ir slopinimu; ir pastoviais oro parametrais: UG sklidimo greičiu ir tankiu), atspindžių nuo UG keitiklio ir reverberacija (su reguliuojamu atstumu nuo perduodančio keitiklio (3) iki lapo (2) ir atstumu nuo priimančio keitiklio (4) iki lapo (2)), kurį sukelia šie atspindžiai. Šis sumodeliuotas signalas yra lyginamas su išmatuotu „bandinio“ signalu. Toliau, iteratyviai keičiami šio sklidimo modelio parametrai, naudojant optimizavimo algoritmą (Particle Swarm Optimization, PSO, Artificial Bee Colony, ABC ar bet kurį kitą tinkamą šiai optimizavimo užduočiai), kol išmatuotas ir sumodeliuotas UG signalai sutampa maksimaliu tikslumu (tai yra, išsprendžiamas atvirkštinis uždavinys).

Modelis apima aplinkos parametrus, tokius kaip oro greitis, tankis ir temperatūra. Nors laboratorinėmis sąlygomis šie parametrai yra stabilūs, tačiau matuojant lapą lauko sąlygomis, jie gali kisti. Šie parametrai iš pradžių apskaičiuojami pagal kalibravimo matavimą (1b pav. kairėje) iš įvertinto atstumo tarp C2 ir C1 signalų (6 paveiksle). Galutinis šių parametrų suderinimas atliekamas pritaikant pilno sklidimo skaitmeninį modelį (9 ir 11 paveiksluose). Taip pat, iš anksto išmatuojamas elektronikos perdavimo funkcijos skirtumas kalibruojant signalus ir matuojant lapą (7 ir 8 paveiksluose). Kiekvienas užregistruotų kalibravimo ir lapo matavimo signalų rinkinys yra kompensuojamas dėl šios įtakos. Galutinai

pakoreguoti lapo modelio storio, tankio ir ultragarso greičio bei ultragarso slopinimo parametrai sudaro siekiamą matavimo rezultatą.

Signalų sklaidimo per lapą modelis yra panašus į tą, kuris naudojamas dokumente [1] Álvarez-Arenas et al. Dokumente [1], šis modelis aprašo, kaip kalibravimo režimu gautas signalas gali būti konvertuojamas į lapo matavimo režimo signalą. Modelis veikia dažnių srityje. Todėl kalibravimo signalas $cal(t)$ pirmiausia perkeliamas į dažnių sritį, naudojant diskrečiąją Furjė transformaciją (DFT), gaunant $CAL(\omega)$. Pirma, šiame modelyje atsižvelgiama į tai, kad matuojamas lapas išstumia lapo storio h oro sluoksnį. Tai atliekama, dauginant iš eksponentinio daugiklio, dažnių srityje:

$$CAL'(\omega) = CAL(\omega) \cdot e^{\left(i\omega \frac{h}{v_{air}}\right)} \quad (1)$$

Reverberacija augalo lapo storyje modeliuojama naudojant gerai žinomą lygtį iš vėlinimo linijų teorijos. Vieno sluoksnio modelis apibūdinamas taip:

$$M_1(\omega, h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}) = \frac{-2Z_{air}Z_{leaf}}{2Z_{air}Z_{leaf} \cos(k'h) + i(Z_{air}^2 + Z_{leaf}^2) \sin(k'h)} \quad (2)$$

kur Z_{air} yra oro akustinis impedansas, o Z_{leaf} yra lapo akustinis impedansas, k' yra kompleksinis bangos skaičius:

$$k' = \frac{\omega}{v_{leaf}} - i\alpha \quad (3)$$

kur ω yra kampinis dažnis ($2\pi f$), v_{leaf} - išilginis US fazės greitis lapo viduje, α yra išilginis ultragarsinės bangos slopinimo koeficientas:

$$\alpha = \alpha_0 \left(\frac{f}{f_0}\right)^n \quad (4)$$

Oro akustinis impedansas yra

$$Z_{air} = v_{air} \rho_{air} \quad (5)$$

Augalo lapo akustinis impedansas yra

$$Z_{leaf} = v'_{leaf} \rho_{leaf} \quad (6)$$

$$v'_{leaf} = \frac{\omega}{k'} \quad (7)$$

Galiausiai, "bandinio" signalas $S1$ gaunamas taip:

$$S1_{sim}(\omega) = CAL'(\omega) \cdot M_1(\omega, h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}) \quad (8)$$

Jeigu reikalingas “bandinio” signalas laiko srityje, tai atliekama panaudojus atvirkštinę DFT (IDFT), taip gaunamas $cal(t)$.

Daugkartinių „lapo-keitiklio“ tipo atspindžių modelis. Daugkartinių atspindžių lapas-keitiklis S2 ir S3 sklidimo modeliai gali būti išvesti iš bendros ultragarsinių bangų sklidimo teorijos sluoksniuotose struktūrose, pavyzdžiui, aprašytos [9] dokumente. Modelis aprašo, kaip sumodeliuotas signalas S1 gali būti konvertuojamas į S2 ir S3 signalus. Modelis veikia dažnių srityje. Pirma, modelis atspindi lapų atspindį R_{leaf} , naudojant lapų ir oro parametrus. Tada reverberacija aprašoma, kaip M2 ir M3 ir S2 ir S3:

$$S2_{sim}(\omega) = CAL'(\omega) \cdot M_1(\omega, h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}) \cdot R_{leaf}(\omega, h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}) \cdot M_2(\omega, d, d2, v_{air}, \rho_{air}) \quad (9)$$

$$S3_{sim}(\omega) = CAL'(\omega) \cdot M_1(\omega, h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}) \cdot R_{leaf}(\omega, h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}) \cdot M_3(\omega, d, d2, v_{air}, \rho_{air}) \quad (10)$$

Daugkartinių „keitiklio-keitiklio“ tipo atspindžių modelis. Ultragarsinio signalo “keitiklis-keitiklis” tipo sklidimo S4 modelis gali būti išvestas iš bendros ultragarsinių bangų sklidimo teorijos sluoksniuotose struktūrose, pavyzdžiui, aprašytos [9] dokumente. Modelis aprašo, kaip sumodeliuotas signalas S1 gali būti konvertuojamas į signalą S4. Modelis veikia dažnių srityje. Modelis įvertina atspindį nuo keitiklio ir sklidimą R_{TT} , kuris užrašomas:

$$R_{TT}(\omega) = C2(\omega)/C1(\omega) \quad (11)$$

Tada sumodeliuotas S4 yra užrašomas:

$$S3_{sim}(\omega) = CAL'(\omega) \cdot M_1(\omega, h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}) \cdot R_{TT}(\omega) \cdot M_4(\omega, d, v_{air}, \rho_{air}) \quad (12)$$

Nenaudingų atspindžių pašalinimas iš matavimo signalo. Ši problema atsiranda, naudojant ilgus lapo ultragarsinio zondavimo signalus. Ji sprendžiama iteraciniu būdu, rekonstruojant lapo matavimo signalą. Pirmoji signalo pavyzdžio kopija išsaugoma. Tada iš signalo C1 sukuriamas signalas S1, optimizuojant M1 modelį PSO optimizatoriaus pagalba (tai dalinis atvirkštinio uždavinio sprendimas). Tada, iš lapo (“pavyzdžio”) matavimo signalo atimamas signalas S1, o likęs rezultatas yra laikomas kaip lapo (“pavyzdžio”) matavimo signalas. Tokiu būdu, yra geriau atidengiami S2 ir S3, siekiant pagerinti konvergencijos kriterijų jautrumą.

Tada sukuriamas S2+S3 iš signalo C1, optimizuojant M2 ir M3 modelius PSO optimizatoriaus pagalba. Tada, iš lapo ("pavyzdžio") matavimo signalo atimami signalai S2 ir S3. Tokiu būdu, yra geriau atidengiamas S4, siekiant pagerinti konvergencijos kriterijų jautrumą. Tada iš signalo C1 sukuriamas S4, optimizuojant M4 modelį PSO optimizatoriaus pagalba. Signalai S2, S3 ir S4 atimami iš pradinio lapo ("pavyzdžio") matavimo signalo. Tokiu būdu, yra geriau atidengiamas S1, siekiant pagerinti konvergencijos kriterijų jautrumą. Procesas kartojamas tol, kol pasiekiami iš anksto nustatyti proceso įvykdymo kriterijai. Iteracijų skaičiavimas naudotas apdorojimo veiksmų sekos diagramoje (11 paveiksle), čia pateiktas tik kaip proceso įvykdymo kriterijų galimų variantų pavyzdys.

Atsako įvertinimo būdo žingsniai. Atsako įvertinimo būdas (parodytas 11 paveiksle), skirtas lapų atsako ultragarsiniam matavimui (2), apima šiuos žingsnius:

- (3.1) UG matavimo sistemos konfigūracijoje pateikiamas tiriamojo lapo modelis, apibrėžtas šiais parametrais: lapo storio, tankio, ultragarso sklaidimo greičiu ir slopinimu; pateikiamas atstumas tarp ultragarsinių keitiklių;
- (3.2) atliekamas sistemos triukšmo ir perdavimo spektro matavimas kalibraciniame režime (be lapo);
- (3.3) suformuojamas APWP SS etaloninis signalas (11) pasirinktam/pakankamam signalo triukšmo santykiui SNR, remiantis žingsnio 3.2 rezultatais;
- (3.4) Atliekamas lapo atsako ultragarsinis matavimas, tiksliau pažingsniui:
 - (3.5) Atliekamas ultragarsinio matavimo ciklas, be lapo, ir jo metu užregistruojamas išmatuotas UG signalas (kalibracinis režimas);
 - (3.6) Įdedamas tiriamasis augalo lapas (2) į ultragarsinio matavimo kanalą (5) ir atliekamas „bandinio“ lapo (2) ultragarsinis matavimas;
 - (3.7) Užregistruoti UG matavimo signalai perduodami per ryšio prievadą (9), saugojimui ir tolesniam apdorojimui;
- (3.8) Atliekamas išmatuoto lapo parametrų įvertinimas, tiksliau pažingsniui:
 - (3.9) Įvertinamas ultragarso sklaidimo ore greitis ir oro tankis iš kalibracinio matavimo: įvertinamas sklaidimo laikas (ToF) tarp signalų C1 ir C2, apskaičiuojamas ultragarso sklaidimo ore greitis: $v_{air}=2d/ToF$, įvertinama oro temperatūra $T= v_{air}^2 /402.0025-273.15$, apskaičiuojamas oro tankis $\rho_{air}=p/(R_s \times T)$, čia R_s – specifinė dujų konstanta sausam orui (287.058

J/kg.K); arba naudojamos bet kokios kitos alternatyvios oro tankio įvertinimo priemonės;

- (3.10) Signalai C1 ir C2 atskiriami ir transformuojami į dažnių sritį, apskaičiuojamas ultragarso sklaidimo ir atspindžių tarp UG keitiklių modelis $R_{TT}=C2/C1$;
- (3.11) Kompensuojama elektronikos įtaka lapo ("bandinio") matavimo signalui, praleidžiant jį per kompensacinį filtrą F_c , $SAM_{exp}=F_c(SAM_{raw})$; padaroma jo kopija $SAM=SAM_{exp}$; iteracijos skaitiklis nustatomas į pradinę būseną $n=1$;
- (3.12) Randamas signalo S1 atvirkštinio uždavinio sprendinys, naudojant tik lapo sklaidimo modelį $M_1(h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air})$, ir PSO algoritimą optimizuojami parametrai $h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}$, naudojant v_{air}, ρ_{air} konstantas;
- (3.13) Sumodeliuojamas "bandinio" signalas S1, tam panaudojant (3.12) žingsnyje gauto sprendinio rezultatus $S1_{sim} = C1 \times M_1(h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air})$;
- (3.14) Iš "bandinio" signalo SAM atimamas signalas $S1_{sim}$, o gautas rezultatas priskiriamas "bandinio" signalui SAM: $SAM=SAM - S1_{sim}$
- (3.15) Randamas signalo $S2+S3$ atvirkštinio uždavinio sprendinys naudojant PSO algoritimą, sklaidimo lape modelį $M_1(h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air})$ ir reverberacijos modelius $M_2(v_{air}, \rho_{air}, d2, d)$ ir $M_3(v_{air}, \rho_{air}, d1, d)$; optimizuojami atstumai $d1, d2$, naudojant $h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}$ konstantas;
- (3.16) Sumodeliuojami "bandinio" signalai $S2_{sim} + S3_{sim}$, tam panaudojant (3.15) žingsnyje gauto sprendinio rezultatus: $S2_{sim}=C1 \times M_1(h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}) \times M_2(v_{air}, \rho_{air}, d2, d)$, $S3_{sim}=C1 \times M_1(h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}) \times M_3(v_{air}, \rho_{air}, d1, d)$;
- (3.17) Iš "bandinio" signalo SAM atimami signalai $S2_{sim}$ ir $S3_{sim}$, o gautas rezultatas priskiriamas "bandinio" signalui SAM: $SAM=SAM - S2_{sim} - S3_{sim}$
- (3.18) Randamas signalo S4 atvirkštinio uždavinio sprendinys, naudojant sklaidimo lape modelį $M_1(h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air})$ ir reverberacijos modelį $M_4(v_{air}, \rho_{air}, R)$; optimizuojami parametrai v_{air}, ρ_{air} , naudojant $h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}$ kaip konstantas;

- (3.19) Sumodeliuojamas "bandinio" signalas S_{4sim} tam panaudojant (3.19) žingsnyje gauto sprendinio rezultatus: $S_{4sim} = C1 \times M_1(h, v_{leaf}, \alpha, \rho_{leaf}, v_{air}, \rho_{air}) \times M_4(v_{air}, \rho_{air}, R)$;
 - (3.20) Iš "bandinio" signalo kintamojo SAM atimamas signalas S_{4sim} , o gautas rezultatas priskiriamas "bandinio" signalui SAM: $SAM = SAM - S_{4sim}$;
 - (3.21) Patikrinama, ar pasiekti proceso įvykdymo kriterijai; šiame pavyzdyje, įvykdymo kriterijai yra nesudėtingi, tačiau šie konkretūs kriterijai nereiškia ribojimo išradimo realizacijos naudoti kitokius proceso sustabdymo kriterijus; Išėiti iš iteracinio ciklo, jei proceso sustabdymo kriterijai tenkinami, priešingu atveju, toliau vykdomi sekantys proceso žingsniai;
 - (3.22) Iš eksperimentiškai išmatuoto "bandinio" signalo SAM_{exp} atimami trukdantys atspindžiai $S2$, $S3$ ir $S4$, o gautas rezultatas priskiriamas "bandinio" signalui SAM, kuris naudotas (3.12)-(3.20) žingsniuose: $SAM = SAM_{exp} - S2 - S3 - S4$;
 - (3.23) didinama iteracinio ciklo skaitiklio reikšmė, grįžtama į žingsnį (3.12);
 - (3.24) Pagal išmatuotą ultragarsinį atsaką ir patikslintus lapo modelio parametrus įvertinamos lapo fiziologinės savybės,.
- 20 **Lapo atsako įvertinimo būdą įgyvendinanti sistema.** Šis įvertinimo būdas reikalauja didelių skaičiavimo resursų, reikalingų sukurti ir pateikti APWP SS signalus, o atlikus ultragarsinį lapo matavimą - išspręsti atvirkštinį uždavinį ir gauti sprendimo rezultatą. Kita vertus, ultragarsinio matavimo prietaiso (1) praktinė realizacija turėtų būti mažų matmenų (kompaktiška) ir efektyviai naudoti energiją.
- 25 Todėl, pageidautina ir rekomenduojama daug skaičiavimo reikalaujančias lapo atsako įvertinimo būdo funkcijas perkelti ir realizuoti debesų kompiuterijos paslaugose, o minėtą kompaktišką lapo atsako UG matavimo įrenginį (1) sujungti su minėtomis kompiuterinės debesijos paslaugomis nuotoliniu būdu - belaidžiu, mobiliuoju, ar Bluetooth ryšiu. Be to, visos reikalingos lapų matavimo ataskaitos
- 30 (pavyzdžiui, su galimybėmis analizuoti lapų parametrų pokyčius, laikui bėgant, arba šių pokyčių geografinį pasiskirstymą žemėlapyje) UG matavimo prietaiso (1) vartotojui taip pat pateikia atitinkamos šių ataskaitų techninės realizacijos kompiuterinės debesijos paslaugose.

Ultragarsiniai keitikliai, baterija, įtampos keitiklis iš akumuliatoriaus į reikiamas įtampas (įskaitant aukštą įtampą iki 400 V), aukštos įtampos impulsų sekų generatorius, valdomas priėmimo stiprintuvas, analoginio signalo į skaitmeninį keitiklis, buferinė atmintis, mikrovaldiklis proceso valdymui ir duomenų rinkimui bei apdorojimui, ryšio modulis (Bluetooth) duomenų perdavimui ir ryšiui yra sutalpinti viename kompaktišrame įrenginio korpuse.

Užregistruoti lapų matavimo duomenys perkeliama iš lapo UG jutiklio (1) į išmanųjį telefoną. Čia prie matavimo duomenų pridedama geolokacijos informacija, nuotraukos, etiketės ir RF žymų informacija ir šie papildyti duomenys perduodami į debesį. Pagrindinis duomenų apdorojimas (atvirkštinis uždavinys), duomenų saugojimas ir ataskaitų generavimas yra realizuojamas kompiuteriniuose debesyse. Vartotojas prisijungia prie kompiuterinio debesies per išmanųjį telefoną ar kompiuterį, kad perskaitytų matavimo ataskaitas, pateikiamas tekstiniu ar grafiniu formatu.

Tinkamiausias augalo lapo ultragarsinio atsako ir lapo fiziologinių parametrų įvertinimo sistemos variantas pavaizduotas 12 paveiksle. Ši paskirstytų resursų sistema racionaliai įgyvendina aukščiau aprašytą lapo atsako įvertinimo būdą. Ji apima, mažiausiai, lapų jutiklio įtaisą (1), ir taip pat, siekiant įgyvendinti metodo praktinį taikymą, sistema apima ir nešiojamą ryšio ir valdymo įrenginį, kurį su savimi nešiojasi operatorius, o duomenų apdorojimo ir saugojimo kompiuterinis mazgas yra nutolęs stacionarus skaičiavimo įrenginys, pavyzdžiui, serveris, serverių grupė arba skaičiavimo resursai kompiuteriniame debesyje. Tinkamiausiame sistemos įgyvendinimo variante nešiojamasis ryšio ir valdymo mazgas gali būti mobilus išmanusis skaičiavimo įrenginys, pavyzdžiui, išmanusis telefonas, kuris: - užtikrina belaidį (Bluetooth) ryšį su lapo jutikliu (1), prie užregistruotų lapo matavimo signalų prideda geografinės vietos informaciją, nuotraukas, etiketes, RF žymų informaciją, perduoda belaidžiu ryšiu (Wi-Fi arba mobilaus ryšio) tolesniam apdorojimui. O duomenų apdorojimo ir saugojimo mazgas efektyviausiai įgyvendinamas naudojant kompiuterių debesijos pagrindu veikiančias paslaugas (13).

NEPATENTINĖS LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Álvarez-Arenas et al. Determination of Plant Leaves Water Status using Air-Coupled Ultrasounds, 10.1109 /ULTSYM.2009.0188.

2. Fariñas et al. Monitoring plant response to environmental stimuli by ultrasonic sensing of the leaves, Ultrasound Med Biol. 2014 Sep;40(9):2183-94. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2014.04.004. Epub 2014 Jul 9.
3. Fariñas et al. Instantaneous and non-destructive relative water content estimation from deep learning applied to resonant ultrasonic spectra of plant leaves, Plant Methods (2019) 15:128 <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0511-z>.
4. Svilainis et al. Ultrasound Transmission Spectral Compensation Using Arbitrary Position and Width Pulse Sets, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, March 2018, DOI: 10.1109/TIM.2018.2809838.
- 10 5. Svilainis et al. Air-Coupled Ultrasound Resonant Spectroscopy Sensitivity Study in Plant Leaf Measurements, 2021 IEEE Sensors | 978-1-7281-9501-8/21/\$31.00 ©2021 IEEE | DOI: 10.1109/SENSORS47087.2021.9639612.
6. Amoroso et al. Novel Nanocomposite Materials for Improving Passive Layers in Air-coupled Ultrasonic Transducer Applications, IEEE IUS 2019.
- 15 7. Svilainis et al. Ultrasonic Air Coupled Transducer Output Impedance Measurement Technique. 2019. DOI10.5755/j01.eie.25.1.22731.
8. Svilainis et al. Evaluation of the ultrasonic preamplifier noise voltage density. 2014. DOI10.1142/S0218126614500078.
9. L. M. Brekhovskikh, O. A. Godin, Acoustics of Layered Media I. Plane and Quasi-Plane Waves. Springer-Verlag, 1990.
- 20

APIBRĖŽTIS

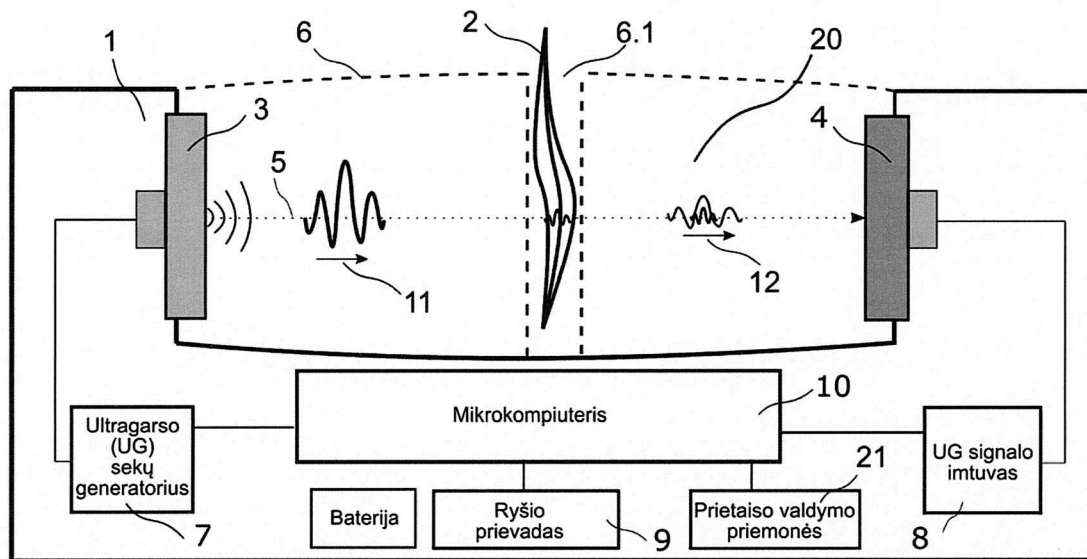
1. Ultragarsinis augalo lapo (2) atsako įvertinimo būdas, kur minėtas atsakas yra vertinamas pagal lapą (2) praėjusio ultragarsinio, UG, signalo išmatuojamus pokyčius, lapui (2) esant patalpintam tarp siunčiančio (3) ir priimančio (4) UG keitiklių supančioje aplinkoje, tinkamiausiu atveju, ore, kur
 - siunčiamas plačiajuostis UG signalas yra sukuriamas žadinant siunčiantį UG keitiklį (3) elektros impulsais, kur sukurtas UG signalas sklinda link priimančio UG keitiklio (4), ir UG signalas, suderintas taip, kad atvaizduotų lapo atsaką savo pakitusiais ultragarso parametrais, yra priimamas ir registruojamas priimančiame UG keitiklyje (4),
 būdas, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad apima
 - skleisto spektro UG signalas skleidžiamas iš siunčiančio US keitiklio (3), US keitiklyje sužadintas elektros impulsų seka, kur sekoje impulsų skaičius, jų atskiri pločiai ir laiko tarpai tarp impulsų parenkami taip, kad būtų gautas iš anksto nustatytas signalo-triukšmo santykis SNR, o US signalo dažnių juostos plotis apimtas toks, kuriame tiriamasis lapas (2) sukuria savo rezonansinius atsakus;
 - įvertinimo būde naudojamas derinamas skaitmeninis US signalo sklidimo modelis, apimantis
 - i) UG signalo sklidimo modeliavimą per lapo (2) modelį, kur lapo (2) modelį sudaro vienas ar daugiau lapo medžiagos sluoksnių, apibrėžtų sluoksnio storio, tankio ir ultragarso sklidimo parametrais, tokiais kaip UG sklidimo greitis ir slopinimas,
 - ii) UG signalo atspindžių modeliavimą nuo lapo (2) ir nuo UG keitiklių (3, 4), kur minėti atspindžiai yra susiję su ultragarso pavėlinimu ir reverberacija dėl lapo (2) sluoksninės struktūros, ir
 - atvirkštinis uždavinys lapo (2) atsako įvertinimui sprendžiamas laiko srityje, koreguojant UG signalo sklidimo modelio parametrus, kad jie geriausiai atitiktų su lapu (2) gautą UG matavimo signalą, užregistruotą priimančiame UG keitiklyje (4).
2. Būdas pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad skleisto spektro UG signalo juostos plotis, kurioje yra išreiškiami arba tikėtini tiriamojo lapo (2) rezonansiniai atsakai, yra nuo 200 kHz iki 1000 kHz.

3. Būdas pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad optimizavimo algoritmai, tinkamiausi suderinti ultragarsinio signalo sklidimo modelį ir jo parametrus su užregistruotu ultragarsiniu lapo (2) matavimo signalu, yra šie: Particle Swarm Optimization, PSO, Artificial Bee Colony, ABC.
- 5 4. Būdas pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad modelyje suderinti ir gauti lapo (2) sluoksnių storio, tankio, US sklidimo greičio ir slopinimo parametrai, siekiant įvertinti lapo (2) fiziologinį atsaką, toliau transformuojami į tiriamo lapo (2) fiziologinius parametrus, tokius kaip, santykinis vandens potencialas RWC, turgoro praradimas, turgoro slėgis, vandens potencialas.
- 10 5. Būdas pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad siunčiančio UG keitiklio (3) žadinimo elektros impulsų sekos parametrai yra: konfigūruojamos atskirų elektros impulsų trukmės ir laiko tarpai tarp jų, bei konfigūruojama elektros impulsų visos sekos amplitudė.
- 15 6. Būdas pagal 1 ir 5 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad elektros impulsų seka sukonfigūruojama taip, kad siunčiantis US keitiklis (3) skleidžia pasirinktos laikinės pozicijos ir pločio impulsų skleistą spektro APWP SS ultragarsinius signalus, arba moduluojamo dažnio harmoninį „chirp“ tipo UG signalą, arba ultragarsines kodines impulsų sekas.
- 20 7. Būdas pagal bet kurį iš 1-6 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad atvirkštinio uždavinio sprendimas naudojant UG signalo sklidimo modelį apima:
- C1: UG signalą, sklindantį iš UG siųstuvo (3) į priimantįjį UG keitiklį (4), užregistruotą kalibraciniu režimu be tiriamojo lapo (2);
 - C2: registruotas antrinis UG signalo atspindys kalibraciniu režimu be tiriamojo lapo (2), sklindantis tarp UG keitiklių (3, 4) 3 kartus ir priimamas priimančiu UG keitikliu (4);
 - 25 • S1: lapo (2) matavimo signalas, registruojamas priimančiu UG keitikliu (4), kai augalo lapas (2) įdėtas į lapo tarpelį (6.1);
 - S2: išsiųstas UG signalas, kuris sklido per lapą (2), tada atsispindėjo nuo priimančio keitiklio (4), tada atsispindėjo nuo lapo (2) ir buvo priimtas priimančiu UG keitikliu (4);
 - 30 • S3: išsiųstas UG signalas, kuris atsispindėjo nuo lapo (2), tada atsispindėjo nuo siunčiančio UG keitiklio (3), sklido per lapą (2) ir buvo priimtas priimančiu keitikliu (4);

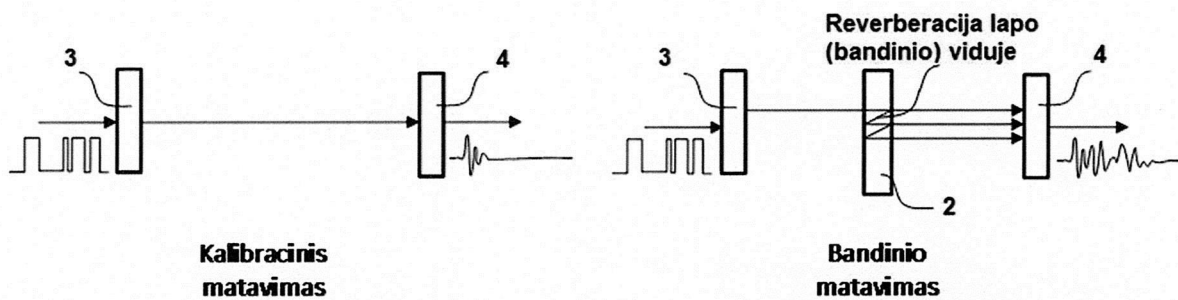
- S4: išsiųstas UG signalas, kuris sklido per lapą (2), tada atsispindėjo nuo priimančiojo keitiklio (4), sklido per lapą (2), atsispindėjo nuo priimančio UG keitiklio (3), sklido per lapą (2) ir buvo priimtas priimančiu UG keitikliu (4),
kur
- 5 • kalibravimo signalai C1 ir C2 naudojami įvertinti
 - C2 sklidimo laiko poslinkį C1 atžvilgiu, ir atitinkamai, ultragarso greitį ore,
 - bei UG signalo spektrinio turinio R_{TT} C2 santykinį pokytį atžvilgiu C1;
 ir toliau
- 10 • sudaromas papildytas UG signalo sklidimo modelis M_{TOT} , kuris yra reguliuojamas papildomais parametrais, sudarytas iš užregistruotų kalibravimo signalų C1 ir C2, bei apimantis atspindžio ir sklidimo per lapą signalus S1, S2, S3, S4,
ir toliau
- 15 • minėtas M_{TOT} modelis yra naudojamas atvirkštiniam uždaviniui spręsti, reguliuojant lapo ir C2-C1 signalų parametrus M_{TOT} modelyje tai, kad būtų geriausiai suderintas lapo (2) UG matavimo signalas, įrašytas priimančiame keitiklyje (4) su M_{TOT} modelyje modeliuojamais S1, S2, S3, S4 signalais, kur gautas atvirkštinio uždavinio sprendinys yra suderinti M_{TOT} modelio parametrai, atitinkantys tiriamojo lapo (2) atsako įvertį.
- 20 **8.** Būdas pagal 1-7 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad elektros impulsų seka US signalui sukurti yra parenkama tokio ilgio, kad registruojamame ir/arba modeliuojamame UG matavimo signale bent du iš S1, S2, S3, S4 signalai persidengia vienas su kitu.
- 25 **9.** Nešiojamas ultragarsinis prietaisas (1), skirtas įvertinti augalo lapo (2) atsaką pagal UG signalus, perduodamus per lapą (2), kur minėtas įrenginys (1), įgyvendina būdą pagal bet kurį iš 1-8 punktų žingsnių, a p i m a n t i s viename korpuse UG matavimo kanalą (20) su UG keitikliais (3, 4), tarpelį įdėti lapą (6.1) į UG matavimo kanalą (20) tarp UG keitiklių (3, 4), bateriją, įtampos keitiklį, aukštos įtampos impulsų generatorių (7), valdomą priėmimo stiprintuvą-imtuvą
30 (8), analoginį-skaitmeninį keitiklį, buferinę atmintį, mikrovaldiklį (10) matavimo procesui valdyti ir duomenis priimti, ryšio modulį (9) duomenims perduoti ir palaikyti ryšį su nutolusiomis sistemomis.

10. Įrenginys (1) pagal 9 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad ultragarsinio UG matavimo kanalas (20) yra statinaitės arba cilindro formos, su UG keitikliais (3, 4) įrengtais UG matavimo kanalo (20) galuose, ir su lapo įterpimo tarpeliu (6.1), kuris įrengtas tarp UG keitiklių (3, 4), tinkamiausiu atveju, per vidurį tarp jų.
- 5 11. Ultragarsinio matavimo sistema augalo lapo (2) atsakui įvertinti pagal ultragarsinius signalus, perduodamus per lapą (2), sistema b e s i s k i r i a n t i tuo, kad apima įrenginį (1) pagal 9-10 punktus ir įgyvendina lapo ultragarsinio atsako įvertinimo būdą pagal 1-8 punktus.
12. Sistema pagal 11 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad šios sistemos
- 10 tinkamiausią įgyvendinimo variantą sudaro:
- augalo lapų jutiklio įtaisas (1) pagal 9-10 punktus;
 - nešiojamas terminalinis įrenginys (12), skirtas komunikacijai ir sistemos valdymui, pavyzdžiui, mobilus išmanusis įrenginys ar išmanusis telefonas, užtikrinantis belaidį ryšį su lapo jutiklio įrenginiu (1), papildantis gautus lapo UG matavimo duomenis geografinės vietos informacija, nuotraukomis, etiketėmis,
 - 15 RF žymėjimo informacija ir atliekantis minėtų UG matavimo duomenų perdavimą belaidžiu ryšiu tolesniam apdorojimui ir saugojimui;
 - apdorojimo ir saugojimo mazgas (13), toks, kaip kompiuterinių debesų arba serverio infrastruktūros paslaugos, skirtos apdoroti skaitmeninius signalus
 - 20 apdoroti, atlikti atvirkštinio uždavinio sprendimo skaičiavimus, duomenų saugojimą ir generuoti ataskaitas, jas pateikiant internetu arba žiniatinklio paslaugas, tekstiniu ir/arba grafiniu formatu.

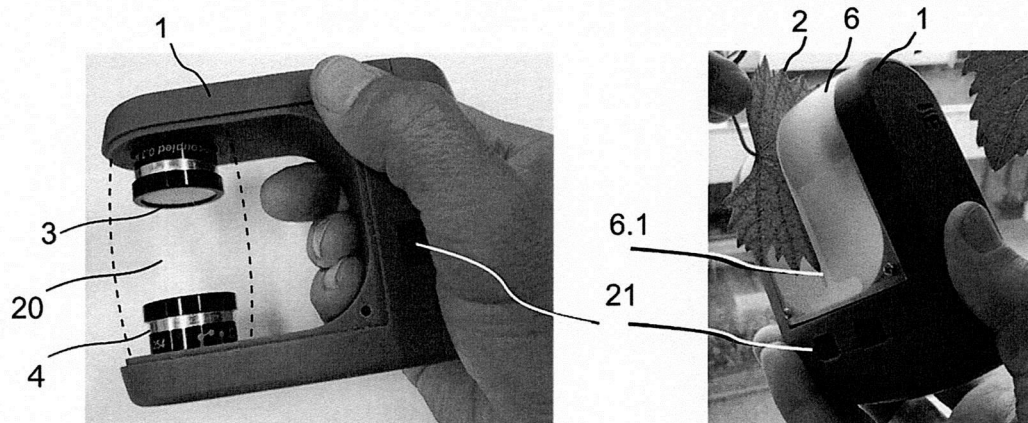
BRĖŽINIAI



a)

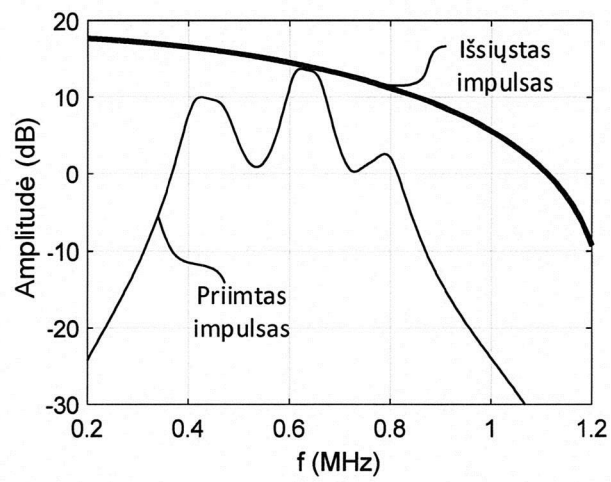


b)

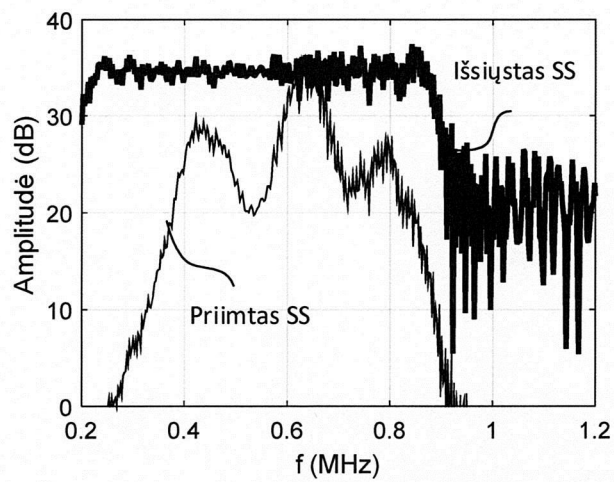


c)

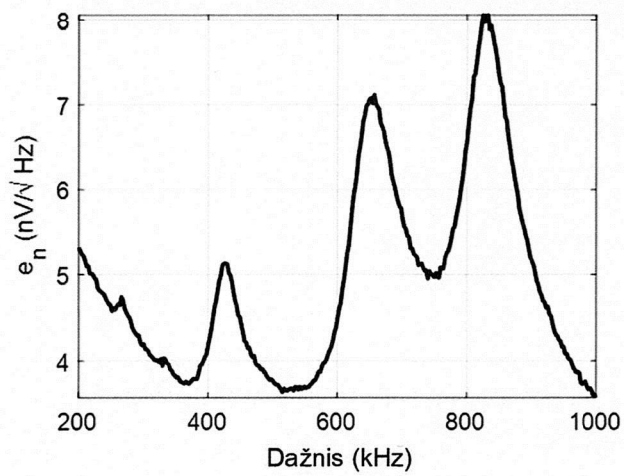
1 pav.



a)

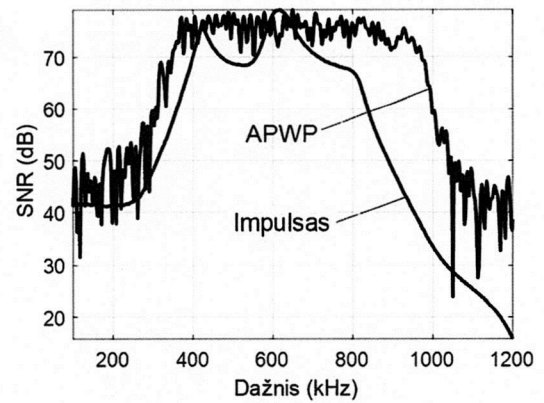
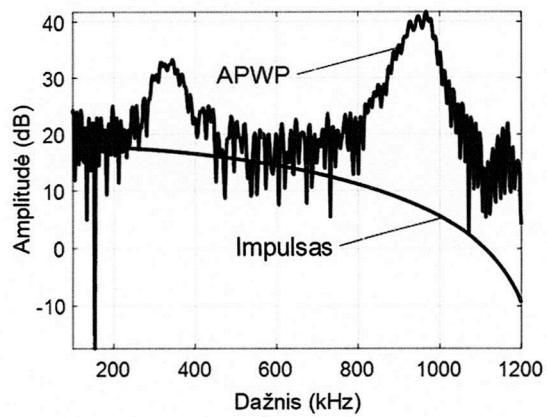


b)

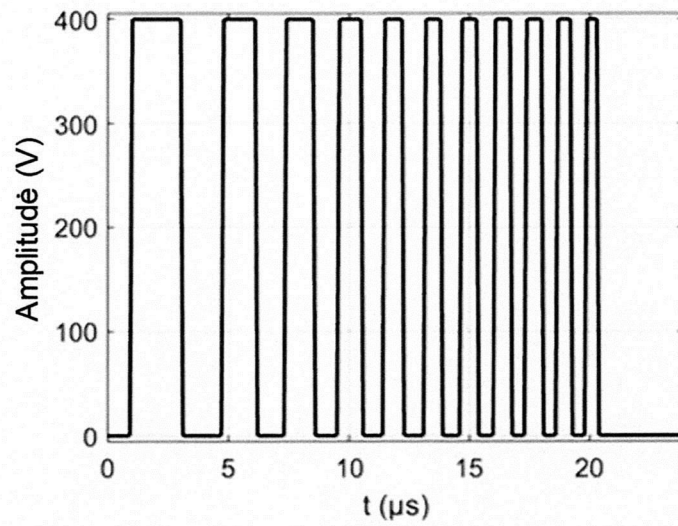


c)

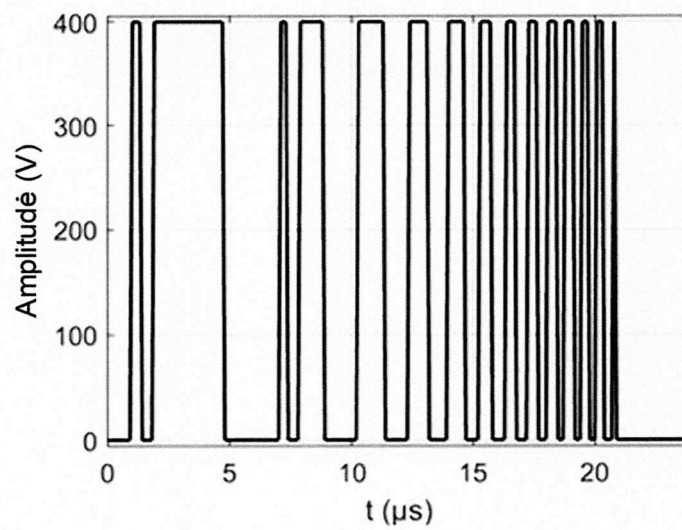
2 pav.



d)

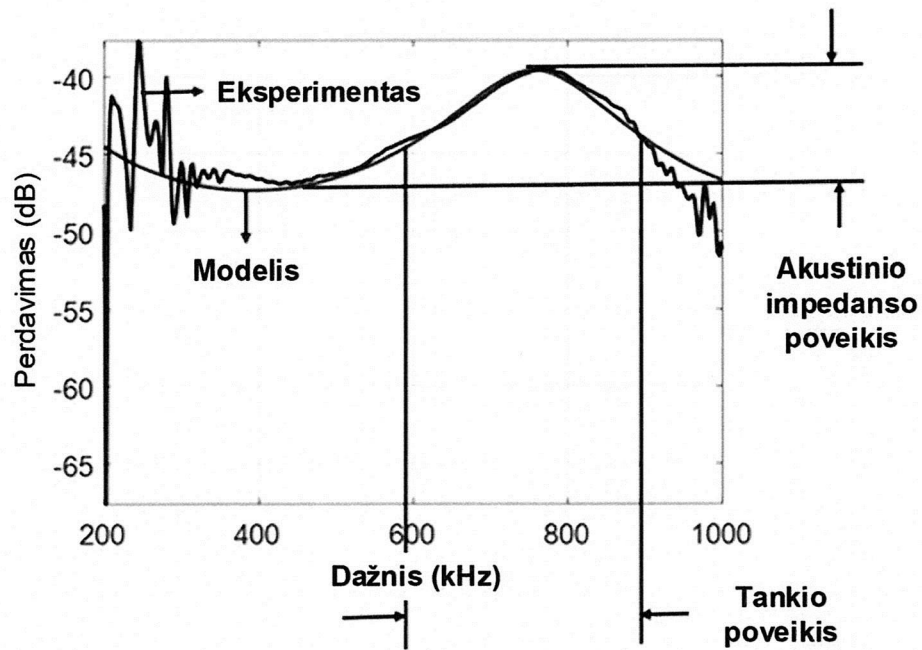


e)

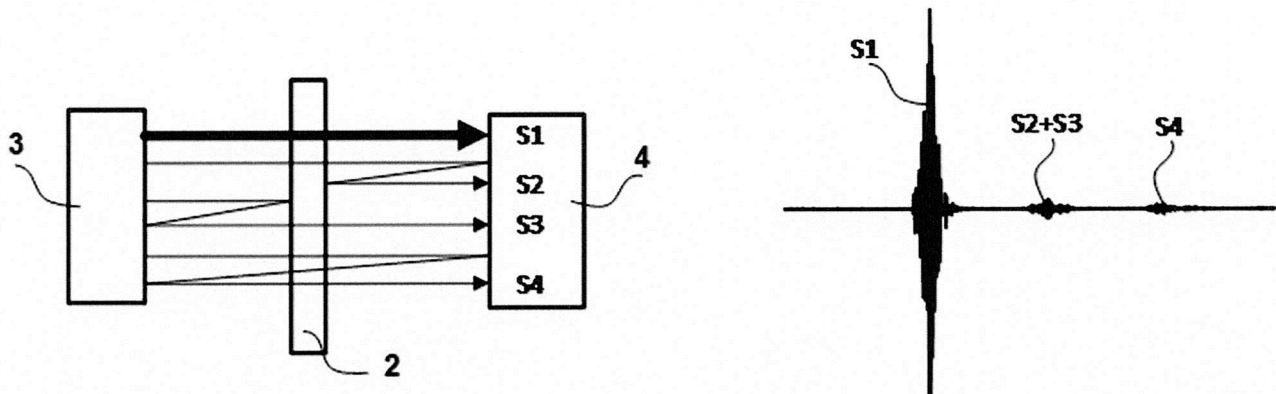


f)

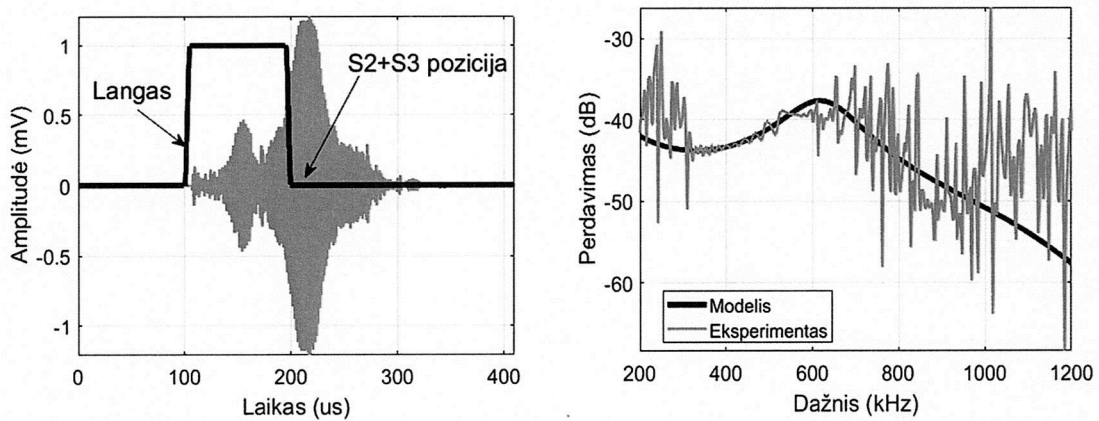
2 pav.



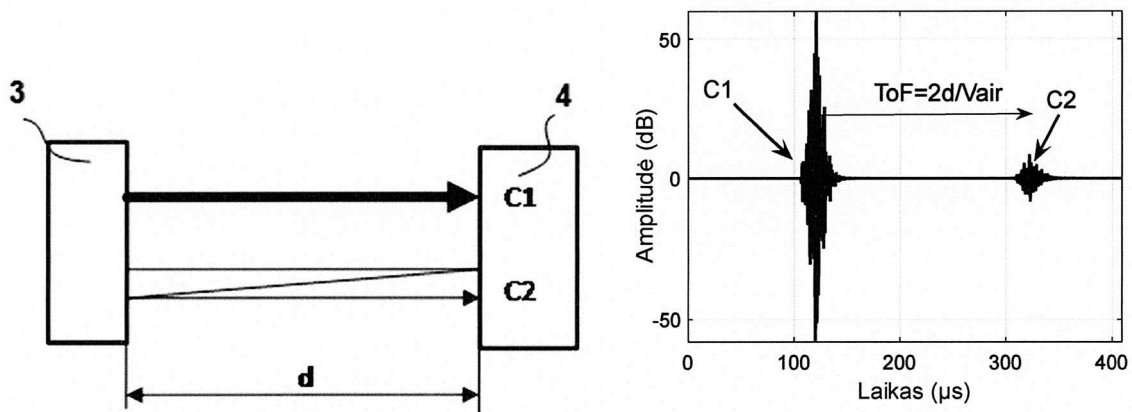
3 pav.



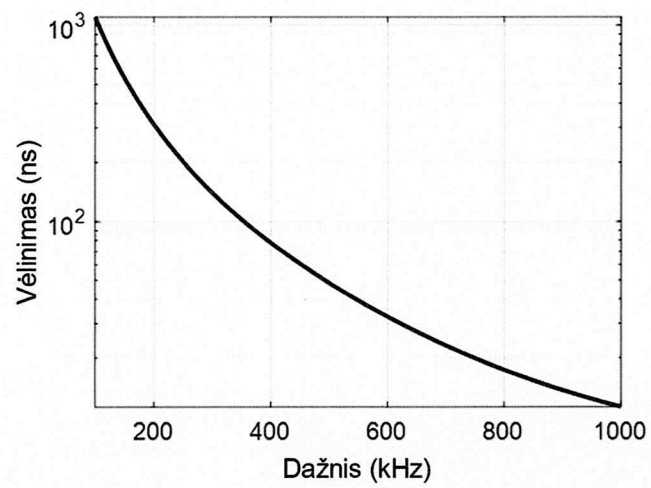
4 pav.



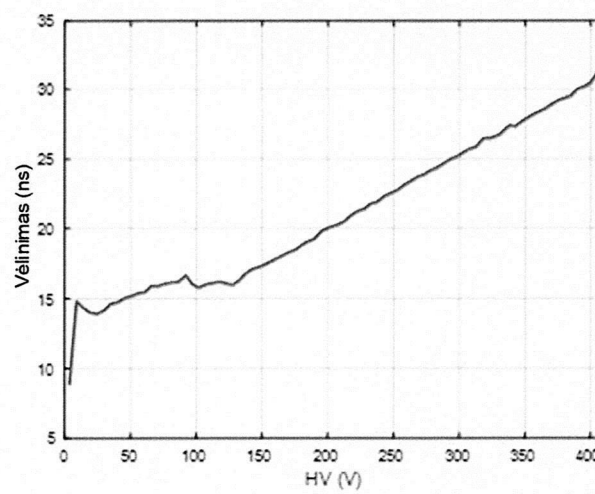
5 pav.



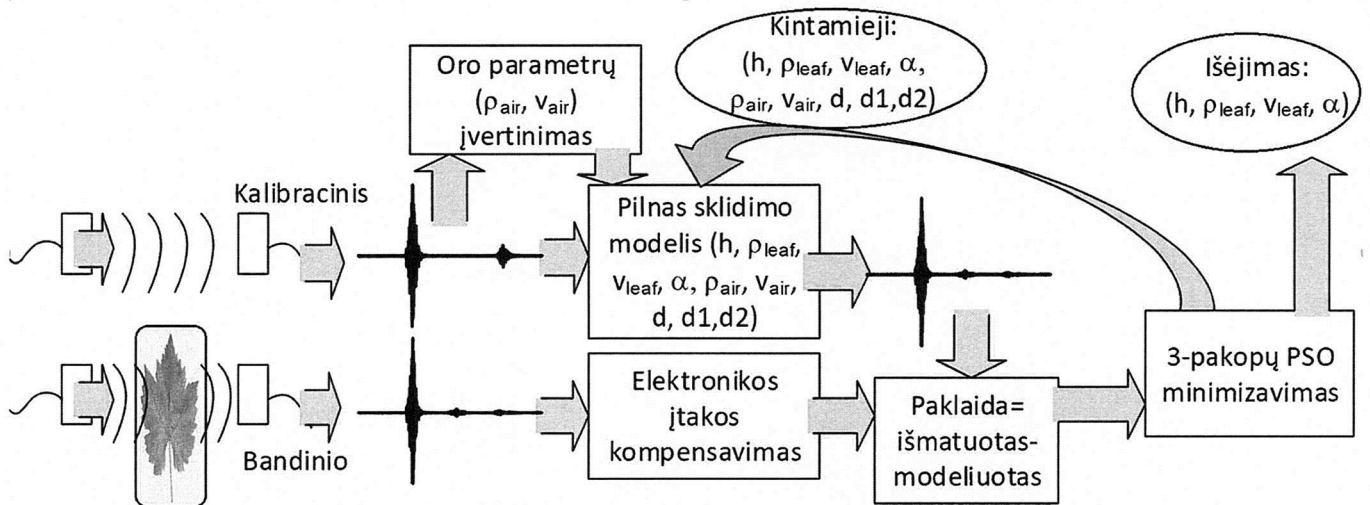
6 pav.



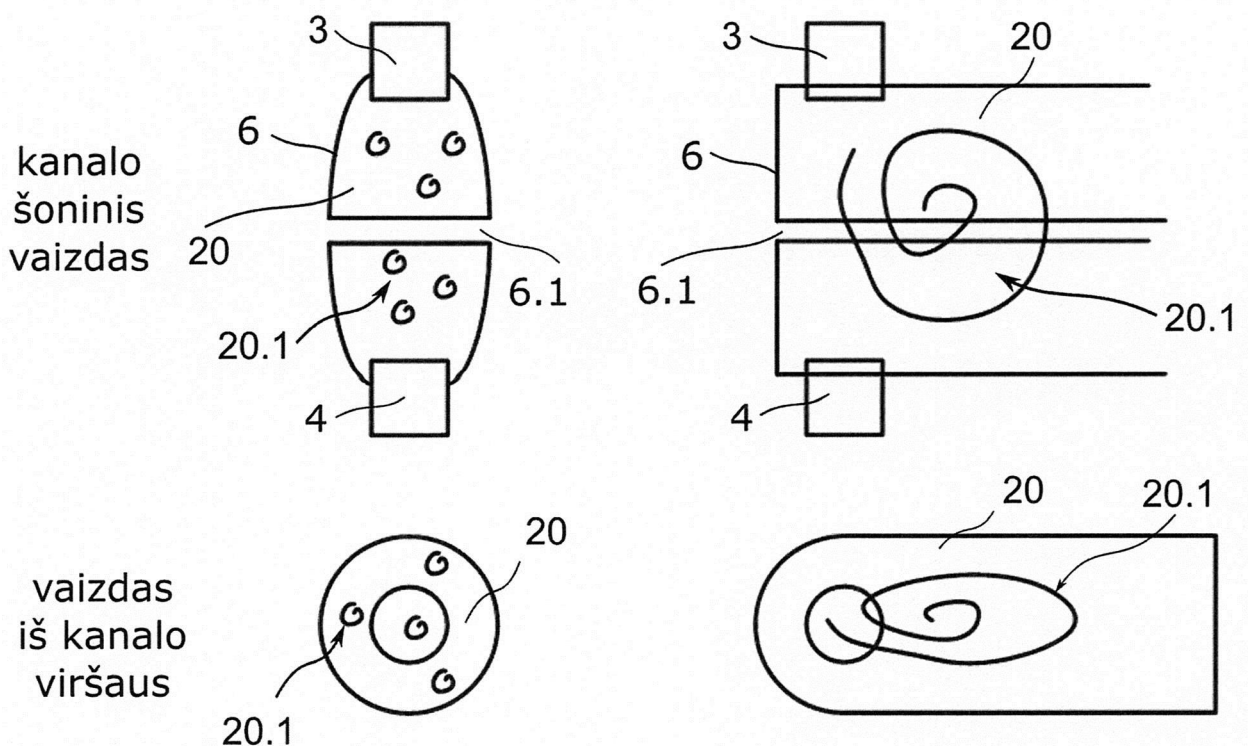
7 pav.



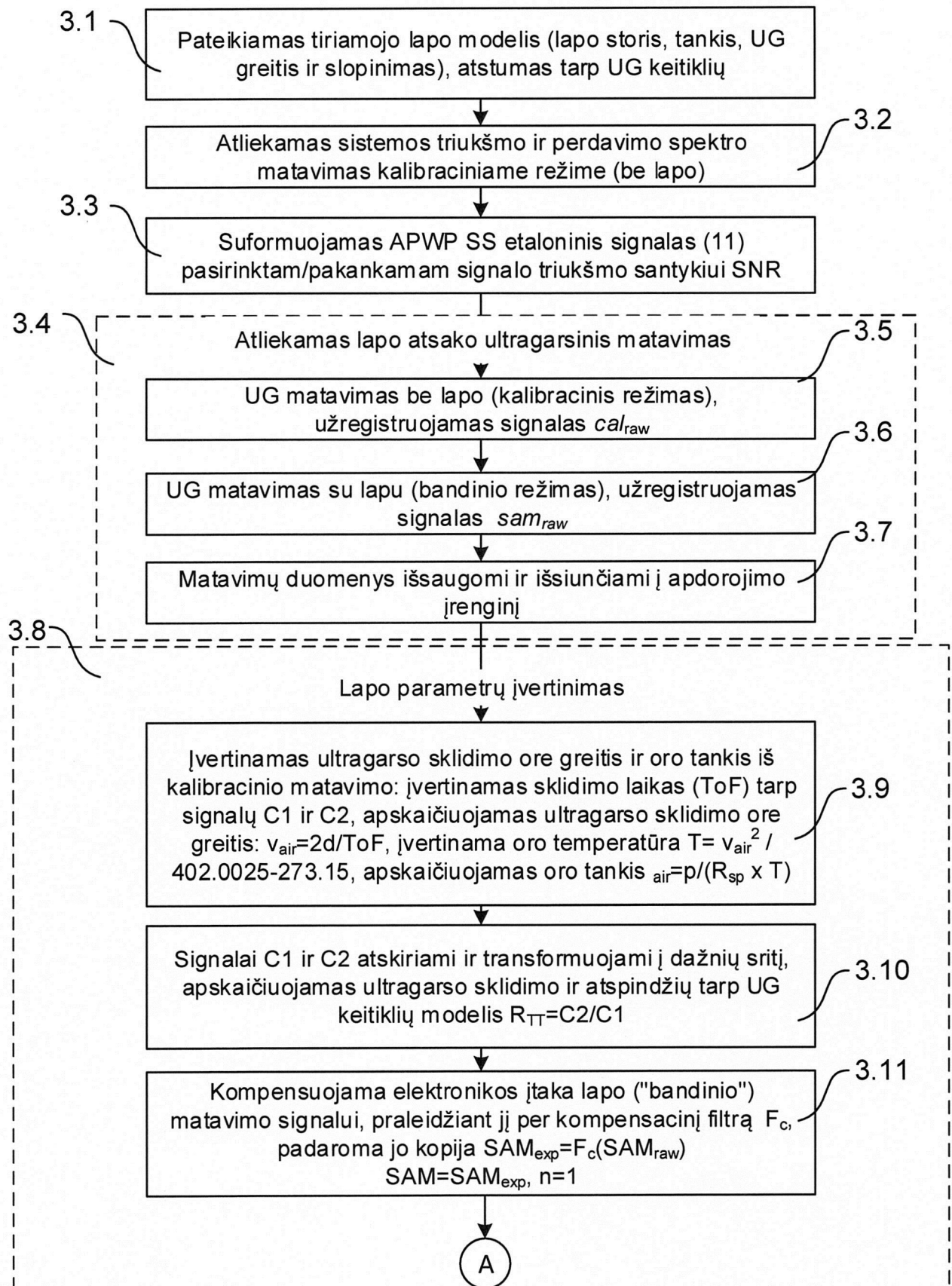
8 pav.



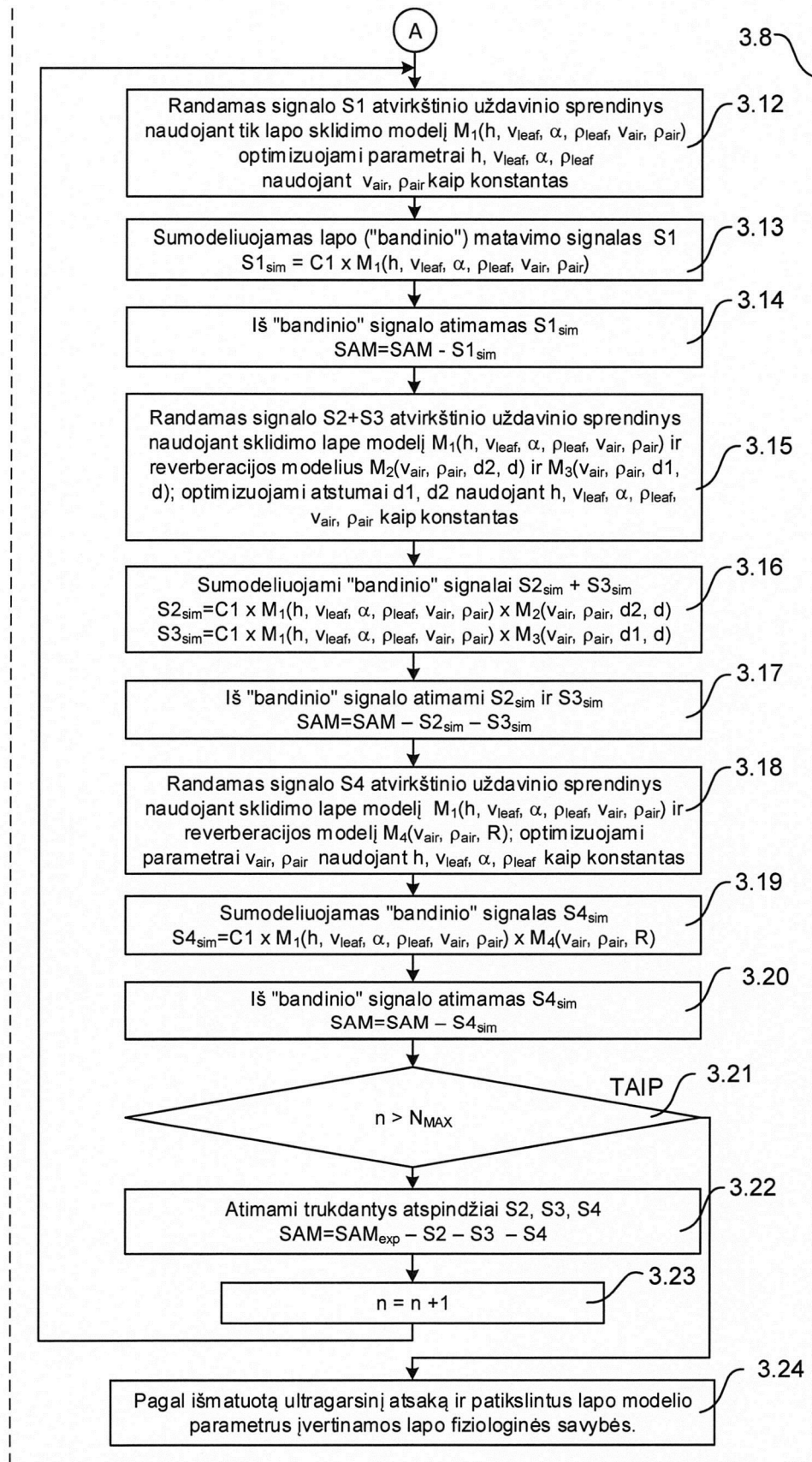
9 pav.

"S"-kanalas**"U"-kanalas**

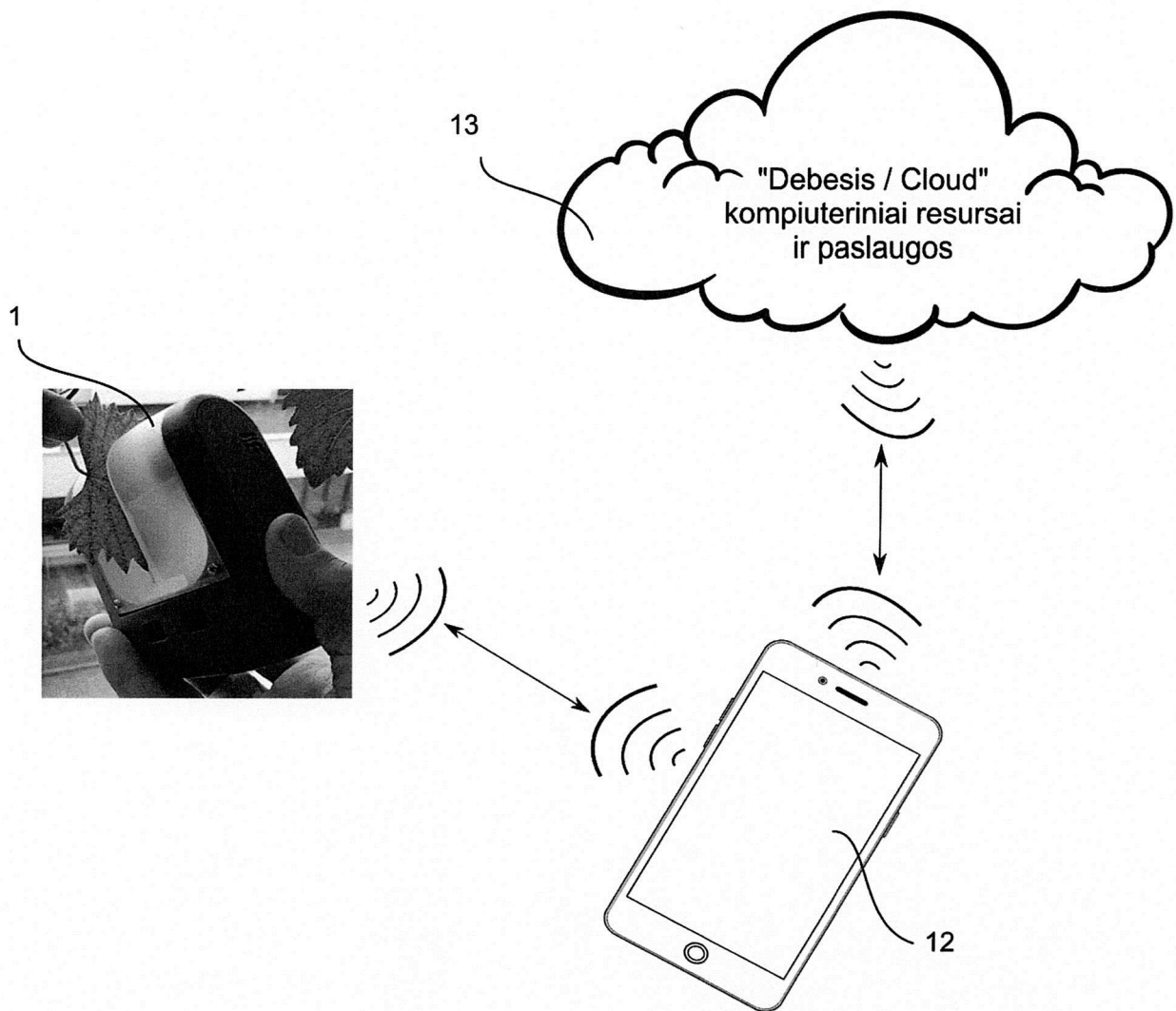
10 pav.



11 pav.



11 pav.



12 pav.