

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **14** (1986/1987)

Številka 6

Strani 294–301

Jože Rakovec:

VREMENSKI RADAR

Ključne besede: fizika, radar.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/14/859-Rakovec.pdf>

© 1987 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA – založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

VREMENSKI RADAR

Radar je naprava, s katero je mogoče opazovati predmete tudi v temi ali v megli, celo skozi oblake, in to na večje razdalje. Prvič so ga operativno uporabljali v večjem obsegu med drugo svetovno vojno v bitki za Anglijo. Sicer so tudi na drugi vojskujoči se strani že imeli radarje, vendar so bili z razvojem Angleži pred vsemi, saj so že leta 1938 vzpostavili mrežo radarjev, resda takrat še majhnih moči in dosegov. Toda že leta 1940 so zgradili prvi moderni radar z močjo 20 kW, ki je deloval na valovni dolžini 10 cm. Tega leta so npr. Nemci uporabljali radarje s še dosti daljšo valovno dolžino: elektromagnetno valovanje, ki ga je oddajal in sprejemal takrat nemški radar, je imelo valovno dolžino 50 cm.

V tem prispevku bomo opisali uporabo radarja, ki je v marsičem prav nasprotna prvotni: z *vremenskim radarjem* ne želimo "gledati" skozi oblake, temveč prav oblake same. Da pa bomo mogli razumeti, zakaj eni radarji "vidijo" skozi oblake, drugi pa ne, moramo povedati, kako radar sploh deluje. To je naprava, ki oddaja elektromagnetne valove v kratkih sunkih, potem pa te valove spet sprejema, če se seveda odbijejo od kakega objekta nazaj proti radarju. Iz primerjave med oddano in nazaj sprejeto močjo elektromagnetnega valovanja sklepamo na velikost in odbojnost tistega objekta, iz časa, ki preteče od oddaje do sprejema, pa na njegovo oddaljenost. Tak je osnovni način dela radarja.

Vremenski radarji delajo z elektromagnetnim valovanjem valovne dolžine λ nekaj centimetrov in navadno dosegajo oblake, oddaljene nekaj sto kilometrov. Oddajajo moč P_o okrog 200 kW, *antensko ojačenje* G_o za oddajanje in G_A za sprejemanje pa je pri moderno zasnovanih radarjih tako, da je v izbrani smeri, kamor je obrnjena antena, nekaj tisočkratno v primerjavi z anteno, ki bi oddajala enakomerno na vse strani ali sprejemala iz vseh strani. Po odboju ali sipanju valovanja na kakem objektu (oblaku) je nazaj sprejeta moč P_A . Radarska enačba pove, kakšno je razmerje med sprejeto in oddano močjo po odboju ali sipanju na objektu, ki ima navidezni, efektivni sipalni presek σ_e in je oddaljen za r :

$$P_A/P_o = G_o G_A \sigma_e \lambda^2 / [(4\pi)^3 r^4]$$

Odvisnost od $1/r^4$ ima dva vzroka: $1/r^2$ je posledica tega, da gostota moči sla-

bi s kvadratom razdalje, še en faktor $1/r^2$ pa je posledica tega, da stožčast radarski curek na večji oddaljenosti preiskuje vedno večje preseke (glej sliko 1).

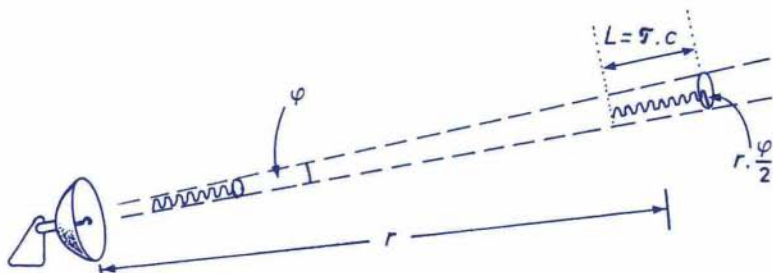
Oceno za velikost razmerja P_A/P_0 dobimo, če izberemo radar z valovno dolžino $\lambda = 5$ cm, z antenskim ojačenjem $G_0 = G_A = 5000$ in oddaljenost objekta $r = 200$ km. Tedaj imamo:

$$P_A/P_0 = 2 \times 10^{-20} \text{ m}^{-2} \sigma_e$$

Ker tudi edina meteorološka količina v tem izrazu, σ_e , ni zelo velika, mora biti radar sposoben zaznavati tudi zelo majhne moči P_A .

V oblakih seveda ni velikih trdnih predmetov, ki bi kot celota tvorili primerno odbojno površino z efektivnim sipalnim presekom σ_e . V njih so drobne *kapljice* različnih velikosti – ali *ledeni kristalčki*, prav tako različnih velikosti in oblik, ali pa mešanica obojega. Včasih celo *sodra* ali *toča*. *Oblačni delci*, to je tisti, ki so tako drobni, da bolj ali manj lebdijo v oblakih, in *padajoči delci* ne odbijajo elektromagnetnega valovanja vsi enako. Tekoče vodne kapljice imajo drugačne lastnosti glede odboja in sipanja, kot če bi bile prav tako velike kroglice v obliki ledu. Važna je tudi velikost, saj o načinu sipanja odloča tudi to, kolikšen je delec v primerjavi z valovno dolžino vpadlega valovanja.

Elektromagnetnega valovanja skoraj ne motijo delci, ki so precej manjši od valovne dolžine. V oblakih je največ oblačnih delcev: vodnih kapljic ali kristalčkov s premerom nekaj mikrometrov ali nekaj deset mikrometrov. Pada-

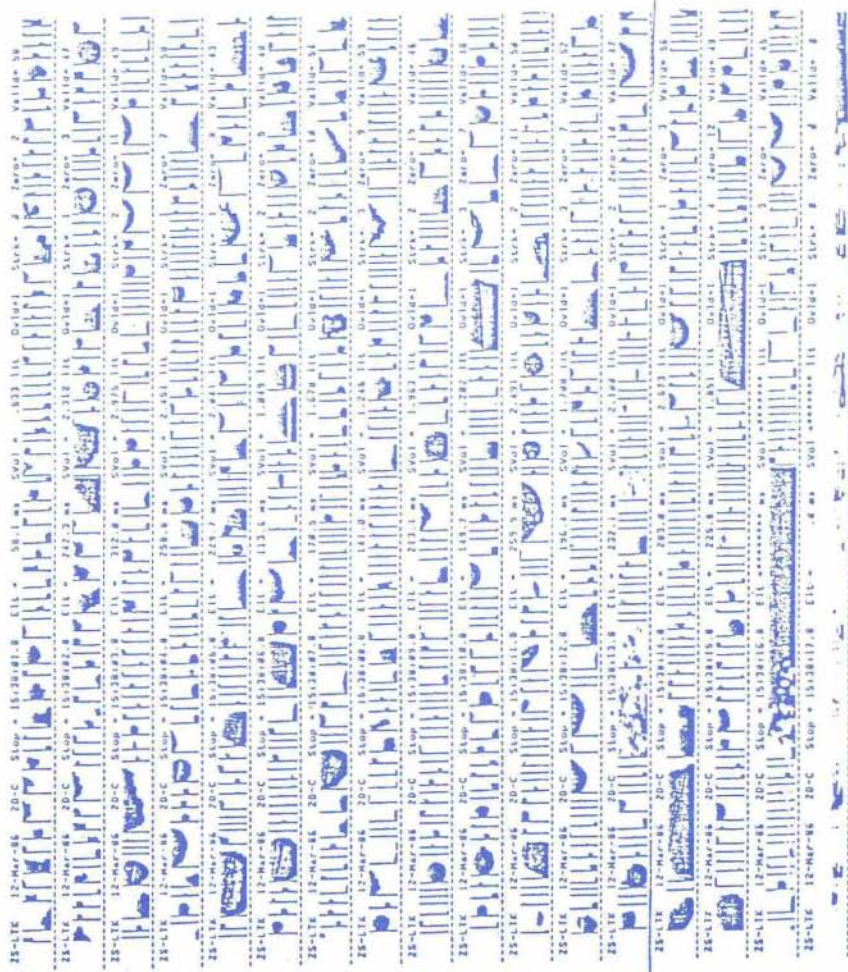


Slika 1. Dolžina radarskega sunka je enaka poti, ki jo naredi valovanje v času trajanja sunka: $L = \tau \cdot c$ (c je hitrost svetlobe). Ker traja sunek ponavadi okrog $3 \mu\text{s}$ in je hitrost valovanja 300 tisoč kolometrov na sekundo, je L okrog 1 km. Osnovni volumen ali "bin", ki ga z enim sunkom preiskuje radar, je tem večji, čim dlje od radarja je ta bin, kajti osnovna ploskev narašča s kvadratom oddaljenosti r , tako da velja $V = L \cdot (r \cdot \varphi / 2)^2$. V resnici en bin preiščejo z več zaporednimi odboji, tako da je podatek iz enega bina v resnici povprečje več podatkov.

joči delci merijo od nekaj desetink milimetra do nekaj milimetrov: večje kapljice dežja se namreč ob padanju razletijo na manjše. Radarjem pri valovni dolžini nekaj deset centimetrov oblaki s svojimi lebdečimi oblačnimi in padajočimi delci ne predstavljajo ovire. Za opazovanje oblakov samih pa moramo izbrati radarje z majhno valovno dolžino. Radarsko valovanje z valovno dolžino en milimeter bi motilo tudi najdrobnejše kapljice, zato so izbrali kot najprimernejše valovanje z valovno dolžino nekaj centimetrov. Radarji, ki delajo pri tej valovni dolžini, "vidijo" debelejšje kapljice, še posebno dobro pa velika zrna toče. Skozi meglo in oblake, v katerih so samo drobne kapljice, pa še vedno zadovoljivo "vidijo". Imeti morajo tudi dokaj ozek *radarski snop*, da z njim preiskujemo posamezne dele oblakov: tako majhne dele oblakov, da zanje smemo privzeti, da so v njih oblačni in padajoči delci vsaj približno enakomerno porazdeljeni in vsaj približno enakih lastnosti.

Curek, ki ga odda radar, zavzema stožec, ki ima pri vrhu le okoli 2^0 . Premer tega snopa na oddaljenosti 100 km je manj kot 2 km. Radarski sunek traja okrog $3 \mu s$, v tem času pa valovanje, ki se razširja s svetlobno hitrostjo prepotuje 1 km. To pomeni, da od enega sunka dobimo iz oddaljenosti 100 km skupen odboj od vsega, kar je v prostoru s prostornino manj kot 1 km^3 . Oblaki so seveda dosti večji, zato tedaj, kadar dobimo kakšen odboj, precej upravičeno predpostavimo, da so po vsem omenjenem prostoru, imenovanem tudi *bin*, enakomerno razporejeni oblačni in padajoči delci. Na robovih oblaka, ko je en del bina v oblaku, drugi pa ne, je zaradi te predpostavke napaka pač nekaj večja.

Oblacni delci nastajajo ali s kondenzacijo vodne pare v drobne kapljice ali pa s "sublimacijo" v drobne ledene kristalčke. Sprva se okrog *higroskopnih jeder*, to je takih, ki se rada omočijo in vpijajo vodo, ustvarijo le gruče nakaj deset ali nekaj sto molekul vode. V prenasičenem zraku rastejo naprej z nadaljnjim izločanjem vodne pare, ko so delci že malo večji, pa rastejo kristalčki na račun kapljic, če v oblaku obstajajo tako eni kot drugi. Tista količina vodne pare v okolici, ki je za kapljice ravno pravšnja, da te ne bi ne rastle niti izhlapevale, je namreč za ledene delce že precej prenasočena: ledeni delci se debelijo in pobirajo vodno paro; ker je zmanjkuje, pa kapljice izhlapevajo, da jo nadomestijo. Tako imamo stalen tok pare od kapljic proti kristalčkom in ta način je ponavadi v oblakih, v katerih je temperatura nižja od 0^0C , najučinkovitejši način rasti oblačnih delcev. Šele večji delci, ki zaradi svoje večje teže sorazmerno hitro padajo, rastejo tudi tako, da med padanjem zadevajo ob druge, bolj ali manj lebdeče delce. Ob trkih se sicer ne zlije ali sprime vsa masa drobnejših delcev, vseeno pa je večji delec pridobi precej. Na ta način predvsem rastejo zrna sode in toče.



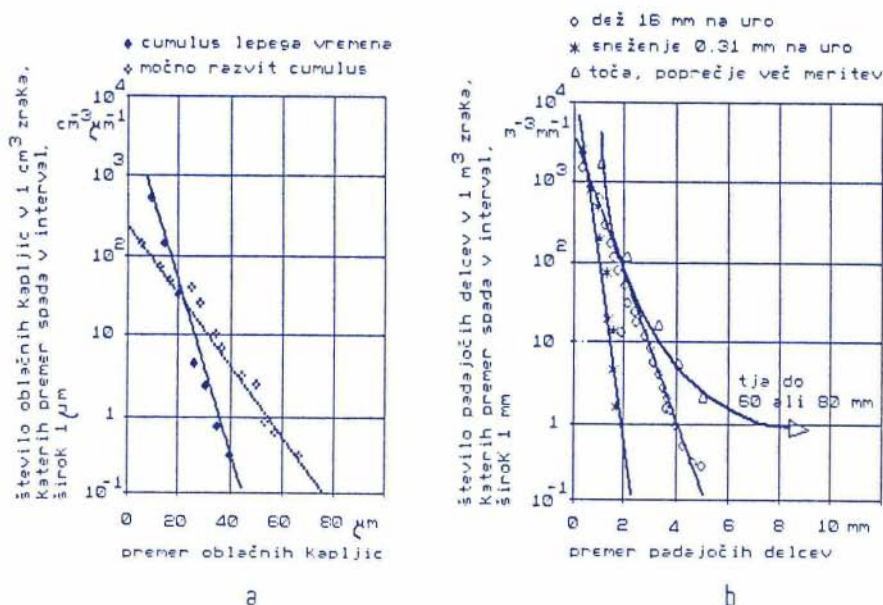
Slika 2. Takole sliko velikosti delcev v oblaku dobimo po računalniški obdelavi podatkov, ki jih zbere na posebnem letalu nameščena naprava, ki jemlje vzorce v oblaku. Vidimo, da so v oblakih delci najrazličnejših velikosti: drobnih je več, večjih pa manj.

Ob vsej tej množici različno velikih delcev v oblakih (slika 2) imamo torej *zvezni spekter* (glej Presek 13, str. 322–333) kapljic oziroma kristalčkov po velikosti. Na sliki 3 vidimo nekaj primerov takih spektrov, posebej za oblačne delce, ki so manjši od 100 μm , posebej pa za padajoče delce, ki tvorijo padavine, če pridejo do tal. Ob množico takih delcev trči radarski snop in se na njih siplje v razne smeri in z različno učinkovitostjo. Efektivni sipalni presek nazaj proti radarju je potemtakem vsota prispevkov sipanj s posameznih delcev, ki se nahajajo v enem binu, v volumnu, ki ga naenkrat kot celoto preiskuje radarski sunek.

Za posamezni delec je efektivni sipalni presek odvisen od velikosti tega delca, in sicer je sorazmeren s šesto potenco premera delca. Za posamezne delce, ki niso veliki v primerjavi z valovno dolžino elektromagnetnega valovanja, je *Rayleigh* izračunal za sipalni presek izraz:

$$\sigma_R = \pi^5 K^2 D^6 / \lambda^4$$

Pri tem je K odvisen do optičnih lastnosti delca, ki so za led drugačna kot za



Slika 3. Če razvrstimo delce v oblakih po velikosti, dobimo spekter, kar nam pove, kolikšno je število delcev v posameznem razredu velikosti. Slika a kaže spekter oblačnih delcev s premerom pod 100 μm , b pa padajočih delcev, ki so večji. Največje dežne kapljice so velike nekaj mm, saj se še večje predvsem zaradi zračnega upora kaj hitro razletijo.

vodo v tekočem stanju. Skupno sipanje je posledica vseh posameznih sipanj.

Radarski odboj je torej odvisen od tega,

1. kako velik je volumen, ki ga naenkrat preiskuje en radarski sunek,
2. kolikšno je število oblačnih in padajočih delcev v tem volumnu,
3. kako so ti delci porazdeljeni po velikosti (kakšen je spekter delcev),
4. v kakšnem agregatnem stanju so ti delci (kakšne so optične lastnosti K za delce),
5. kakšna je valovna dolžina elektromagnetnega valovanja, s katero dela radar,
6. in še od nekaterih pomembnih stvari.

Pri običajnih radarjih imamo za vse te vplive na volje le en sam podatek o razmerju med sprejeto in oddano močjo. Zato je razumljivo, da v radarsko meteorologijo vpletamo še spoznanja o dogajanjih v oblakih. Iz slike 4a vidimo, da imajo vodne kroglice izbrane velikosti enak sipalni presek kot ledene kroglice neke druge velikosti. Tudi majhno število velikih kapljic lahko enako siplje kot veliko število majhnih kapljic in tako naprej. Zato uporabljamo še podatke o poteku temperature, vlažnosti in vetra z višino, ki jih izmerimo z *radiosondami* na dvigajočih se balonih. Učinkovito si pomagamo tudi z računalniškimi modeli, saj z njimi z numeričnimi simulacijami do neke mere ugotavljamo, kakšen "bi moral biti" oblak, ki je nastal v določenih okoliščinah v ozračju. Za podrobnejše spoznavanje *fizike oblakov* v svetu uporabljajo tudi posebej opremljena letala, ki v oblakih samih jemljejo vzorce delcev in merijo tudi druge meteorološke količine. Na tleh so ponekod mreže *dežemerov*, tudi takih, ki zapisujejo časovni potek jakosti padavin. *Točemer* so naprave, na katerih osta-

Preglednica tehničnih karakteristik meteorološkega radarja WR 100-2/77 na Lisci nad Sevnico

Proizvajalec: Enterprise Electronics Corp., Alabama, USA

valovna dolžina	5,3 cm (t.im. C pas)
širina radarskega snopa	1,1 stopinje
čas trajanja sunka	3 μ s
pogostost sunkov	255 s ⁻¹
največja moč	250 kW
občutljivost	103 dBm
doseg	450 km
čas, potreben za pregled celotnega ozračja	
v dosegu radarja	okrog 5 minut

V radar sam je vgrajen predprocesor, ki digitalizira radarske podatke.

Pri radarju sta še dva računalnika Iskra Delta D-340/10 s programsko opremo za opazovanje in arhiviranje podatkov o oblakih ter za operativno vodenje obrambe proti toči.

nejo tako ali drugače ohranjene sledi o tem, koliko in kako velika zrna toče so padla nanje. Vse te informacije povezujemo pri proučevanju fizike oblakov s podatki, ki jih daje radar, pa tudi s splošnim vremenskim dogajanjem, ki je vzrok za nastanek posameznih vrst oblakov.

Tudi sama radarska tehnika izboljšuje informacije. *Dopplerjev radar* poleg oddaljenosti in odbojnosti oblaka meri tudi valovno dolžino odbitega elektromagnetnega valovanja in iz tega določa komponente hitrosti delcev, na katerih je prišlo do sipanja. Mreža vsaj treh Dopplerjevih radarjev daje tridimenzionalno sliko gibanja oblačnih in padajočih delcev.

Kapljice pri padanju niso okrogle, temveč odspodaj zaradi zračnega upora vbočene. Če jih torej gledamo z radarjem, ki dela z valovanjem, ki je omejeno le na vertikalno ravnino, dobimo drugačen odboj, kot če jih gledamo z radarjem, katerega valovanje je omejeno na horizontalno ravnino. Ker rečemo, da je valovanje, ki valovi le v eni ravnini, polarizirano, se imenuje radar, ki lahko meri na oba opisana načina, *radar z dvojno polarizacijo*. Z njim lahko delno ločimo vodne kapljice od ledenih delcev, ki pri padanju niso deformirani,



Slika 4. Sipalni presek kroglice ledu je odvisen od velikosti in od valovne dolžine elektromagnetnega valovanja.

a) Pri radarju, ki dela z valovno dolžino 10 cm, je efektivni sipalni presek za 2,5 cm velike kroglice ledu enak sipalnemu preseku za 1,7 cm velike kroglice vode.

b) Če pa imamo možnost uporabiti tudi radar z valovno dolžino 3,3 cm, bi dobili za 2,5 cm velike kroglice ledu efektivni sipalni presek 4 cm², za 1,7 cm velike kroglice vode pa le 0,1 cm². Tako razločimo z vodo oblita zrna toče od povsem suhih zrn toče.

ali pa določamo hitrost padanja kapljic: pri večji hitrosti so bolj deformirane.

Precej zapleteni so tudi radarji, pri katerih je mogoče izbirati valovno dolžino oddanega valovanja. Taki *radarji z več valovnimi dolžinami* dokaj dobro ločujejo odboj na ledu od odboja na vodi. Tako lahko ločimo ledene kristalčke od kapljic ali pa točo od snežink (glej sliko 4).

Brez računalnikov ob vsej zapletenosti merjenj pri modernih radarjih v meteorologiji ne gre. Radarske podatke je pogosto treba proučevati tudi za nazaj, da si pojasnimo kak pojav. Ker radar zbere v kratkem času ogromno podatkov iz velikega števila binov v prostoru, je treba te podatke urejeno arhivirati, da vemo, kateremu delu prostora in kateremu času pripadajo. Radarji se uporabljajo tudi pri obrambi proti toči. Tudi tam je potreben računalnik, ki je povezan z radarjem. Ta glede na podatke radarja po vnaprej postavljenih postopkih avtomatično vodi izstreljevanje raket. Računalnik izračuna, koliko raket je treba iz posameznih izstrelišč izstreliti v dele oblaka. Operaterju obrambe ostane le še, da po UKV zvezah o tem obvesti strelce in potem v računalnik vstavi sporočilo o izstrelitvi. S snovmi, ki jih rakete razpršijo v izbranem delu oblaka, skušajo vplivati na rast ledenih zrn in tako točo vsaj omiliti.

Jože Rakovec

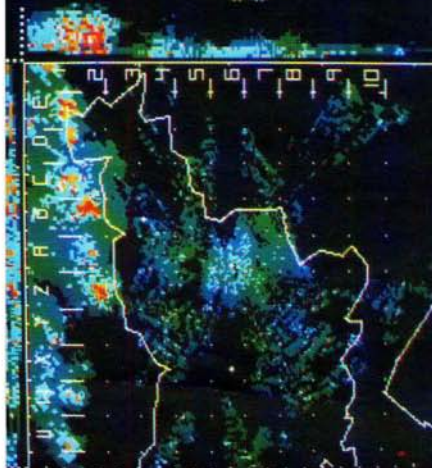
6
PRESEK

DRUŠTVO MATEMATIKOV, FIZIKOV IN ASTRONOMOV SRS LETNIK 14. 1986–87

27-Jul-85
16:40:27



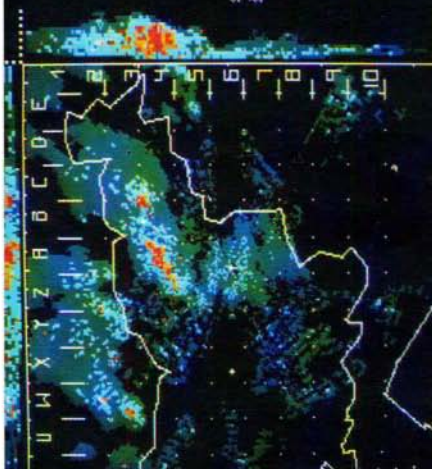
status 126
SUM STC CLT
merit 1
dB/Sum
42.0
38.0
34.0
30.0
24.0
16.0



27-Jul-85
17:58:27



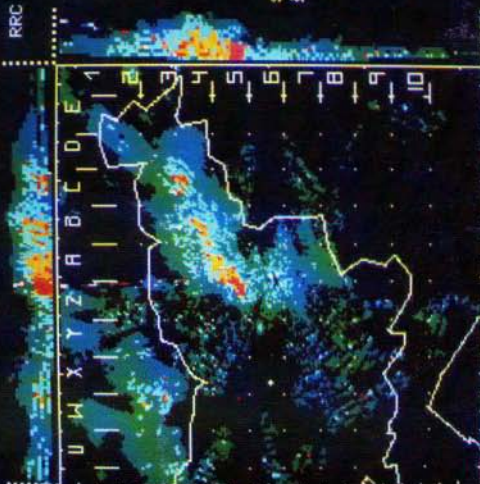
status 126
SUM STC CLT
merit 1
dB/Sum
42.0
38.0
34.0
30.0
24.0
16.0



RRC
L i s c a
27-Jul-85
18:28:27



status 126
SUM STC CLT
merit 1
dB/Sum
42.0
38.0
34.0
30.0
24.0
16.0



RRC
L i s c a
27-Jul-85
19:22:11



status 126
SUM STC CLT
merit 1
dB/Sum
42.0
38.0
34.0
30.0
24.0
16.0

