Pengamatan Awan dan Aerosol Lidar Penuh Waktu, Aman untuk Mata di Program Pengukuran Radiasi Atmosfer Situs: Instrumen dan Pemrosesan Data

Abstrak

Pemaksaan radiasi atmosfer, anggaran radiasi permukaan, dan interpretasi pancaran atmosfer teratas melibatkan pengetahuan tentang struktur ketinggian vertikal dari lapisan awan dan aerosol di atasnya. Selama dekade terakhir, Departemen Energi AS, melalui program Pengukuran Radiasi Atmosfer (ARM), telah membangun empat lokasi pengamatan atmosfer jangka panjang dalam rezim iklim strategis (Oklahoma utara-tengah; Barrow, Alaska; dan Nauru dan Manus). Kepulauan di Pasifik barat tropis). Sistem micropulse lidar (MPL) memberikan pengamatan yang berkelanjutan dan otonom terhadap hampir semua awan atmosfer dan aerosol yang signifikan di setiap fasilitas ARM pusat. Sistem ini kompak, dan pulsa yang ditransmisikan aman untuk mata. Keamanan mata dicapai dengan memperluas energi pulsa keluar yang relatif berdaya rendah melalui teleskop transmisi/penerima koaksial bersama. Spesifikasi sistem ARM MPL dan desain optik unit khusus dibahas. Teknik normalisasi dan kalibrasi data disajikan. Teknik ini, bersama-sama, mewakili paket pemrosesan nilai tambah operasional yang digunakan untuk menghasilkan produk data yang dinormalisasi untuk penelitian cloud dan aerosol ARM.

1. Perkenalan

Keberhasilan, atau kegagalan, simulasi iklim numerik global dapat ditelusuri langsung ke keakuratan hubungan empiris dan parameter input yang diperlukan untuk mereplikasi proses dinamis dan radiasi yang signifikan. Pengetahuan tentang struktur vertikal sifat atau lapisan hamburan awan dan aerosol dari berbagai rezim iklim sangat penting. Analisis fluks radiasi permukaan atau puncak atmosfer saja tidak cukup. Model yang dapat dengan benar menentukan fluks ini mungkin memiliki tingkat pemanasan dan pendinginan yang salah yang tertanam di dalam atmosfer. Ada banyak variabel dan ukuran yang diperlukan untuk memahami sepenuhnya dampak radiasi awan dan aerosol, tetapi pengukuran akurat dari kejadian, tinggi, dan ketebalan relatif jarang. Kekurangan dalam pengamatan global yang esensial dikombinasikan dengan meningkatnya kecemasan seputar dampak konsumsi bahan bakar fosil dan berbagai aktivitas manusia lainnya di atmosfer adalah fokus dari banyak penelitian yang sedang berlangsung (misalnya, Wielicki et al. 1995).

Program Pengukuran Radiasi Atmosfer (ARM) menandai salah satu komponen kunci dari strategi Departemen Energi AS untuk menangani penelitian awan dan aerosol. Filosofi ARM

(Stokes dan Schwartz 1994) adalah untuk mengumpulkan pengukuran yang diperpanjang waktu dari beberapa lokasi dengan membuat dan mengoperasikan lokasi pengamatan jangka panjang yang dilengkapi dengan beragam rangkaian penginderaan jauh pasif dan aktif, serta instrumentasi in situ. Empat situs tersebut sejauh ini telah ditetapkan, mewakili tiga wilayah berbeda: kontinental lintang tengah [Oklahoma tengah-utara (SGP)], tropis [Kepulauan Manus dan Nauru (masing-masing TWP-M dan TWP-N)], dan kutub [Barrow, Alaska (NSA)] rezim.

Deteksi langsung awan atmosfer dan aerosol umumnya melibatkan teknik penginderaan jauh berbasis aktif, seperti radar dan lidar. Sistem lidar sangat sensitif terhadap partikel atmosfer yang lebih kecil karena peningkatan hamburannya pada panjang gelombang yang terlihat (Sassen 1995). Namun, lidar yang terus berjalan (diperlukan untuk persyaratan pengukuran iklim penuh waktu) adalah perkembangan yang cukup baru dan menunjukkan perubahan yang signifikan dari aplikasi tradisional. Biaya yang dikombinasikan dengan sifat pemeliharaan intensif secara historis membatasi penggunaan lidar secara luas (Sassen 1991). Masa pakai yang terbatas dan pertimbangan keamanan yang timbul dari keluaran energi tinggi merupakan kelemahan tambahan. Micropulse lidar (MPL), yang dikembangkan pada tahun 1992 di Pusat Penerbangan Luar Angkasa Goddard (GSFC) (Spinhirne 1993) telah mengatasi banyak kendala seperti itu. Instrumen MPL adalah anggota lama dari rangkaian instrumen ARM. Teknologi MPL menerapkan kemajuan dalam solid-state, laser yang dipompa dioda dengan masa pakai yang cukup lama, dan pengenalan perangkat penghitung foton terbatas kebisingan kuantum efisiensi tinggi. Fitur MPL yang paling menonjol adalah bahwa pulsa energi yang ditransmisikan aman untuk mata. Energi pulsa rendah (mikrojoule—lidar standar secara rutin berkekuatan lebih tinggi) diperluas melalui teleskop pemancar/penerima (transceiver) Cassegrain bersama pada tingkat pengulangan yang tinggi (2500 Hz). Ini menghilangkan persyaratan keselamatan umum dari operasi instrumen yang diawasi, memungkinkan mereka untuk dijalankan secara mandiri.

Data ARM MPL diproses untuk produk standar, termasuk ketinggian lapisan awan dan distribusi vertikal penampang hamburan optik. Kumpulan data dan hasil yang telah diproses disebarluaskan ke komunitas riset atmosfer melalui program ARM. Untuk pengguna data MPL diperlukan referensi untuk fungsi instrumen, kalibrasi, dan metode pengambilan data. Dalam makalah ini kami menjelaskan instrumen MPL dan penggunaannya di situs ARM. Kami selanjutnya menjelaskan sifat sinyal mentah yang diukur dan proses normalisasinya. Analisis propagasi kesalahan dan ketidakpastian koreksi dalam sinyal yang diproses MPL

dapat ditemukan dalam artikel terpisah oleh Welton dan Campbell (2002, manuskrip diserahkan ke J. Atmos. Oceanic Technol., selanjutnya WC02).

2. Instrumen

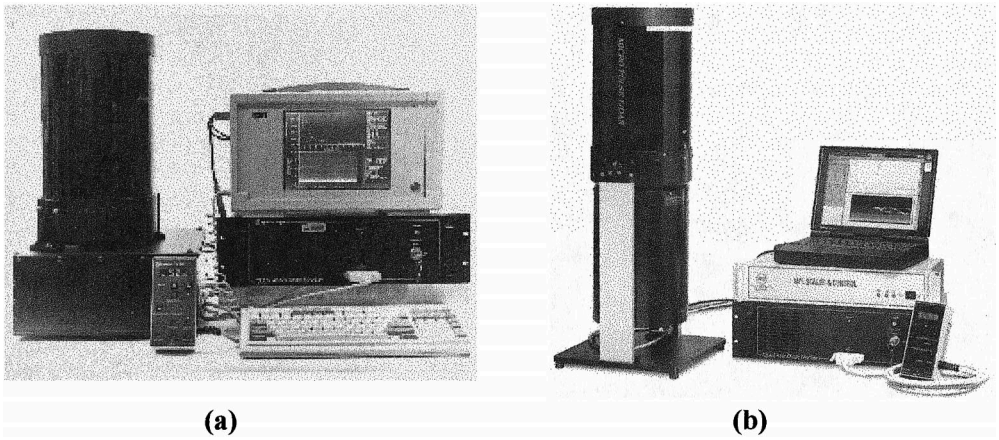


Figure 1 Versi casing instrumen MPL bersama skalar multisaluran, catu daya laser, dan komputer laptop sistem. (a) Desain prototipe (V1.0); (b) desain tabung yang ditingkatkan (V2.0).

Instrumen MPL mendeteksi hampir semua awan troposfer dan aerosol yang signifikan, hingga batas redaman sinyal, melalui penjumlahan pulsa yang cukup besar dan kompresi sinyal geometris (Spinhirne et al. 1995). Selain itu, bidang pandang penerima yang sempit (sekitar 100 rad) menghilangkan komplikasi dari beberapa hamburan dan membatasi efek latar belakang matahari ambien. Paket MPL kokoh dan ringkas, memungkinkan penerapan dan pengoperasian yang sederhana (mengingat lingkungan yang stabil dan tahan cuaca). Sistem telah didemonstrasikan untuk berjalan terus menerus selama periode satu tahun sebelum memerlukan pemeliharaan besar. Selain pengukuran dasar batas awan, data MPL dapat digunakan untuk menghitung penampang hamburan awan dan ketebalan optik, ketinggian lapisan batas planet dan kepunahan aerosol dan profil ketebalan optik, termasuk yang ke dalam stratosfer pada kasus malam hari (Spinhirne 1993). ;Welton dkk. 2001).

Site	Unit	Version	Dates	Δ*V*	Δ*T*
SGP	00	1.0	Dec 1993–Mar 1996	300 m	60 s
	02	1.0	Jan 1996–Aug 1998	300 m	60 s
	54	2.0	Sep–Nov 1998 Jan 1999–present	30 m	30 s
TWP-M	03	1.0	Feb–Nov 1997 Apr 1998–Oct 1999	300 m	60 s
	72	2.1	Aug 1999–Apr 2001 Dec 2001–present	30 m	30 s
TWP-N	59	1.0	Nov 1998–Jan 1999 Apr 1999–Feb 2000 Oct–Dec 2000 Apr 2001–present	30 m	30 s
NSA	58	1.0	Mar 1998–present	30 m	30 s

Tabel 1 mencatat tanggal operasi, diagnosis yang relevan kemampuan dan pengaturan nostic untuk unit ARM MPL historis dan saat ini. Pengukuran di SGP dimulai pada bulan Desember 1993, TWP-M pada bulan Februari 1997, NSA pada bulan Maret 1998, dan TWP-N pada bulan November 1998. Revisi khusus telah dibuat untuk desain papan tempat memotong roti MPL yang dijelaskan oleh Spinhirne (1993), ketika unit mulai digunakan. produksi dan distribusi komersial melalui Science and Engineering Systems, Inc. (SESI) dari Burtonsville, Maryland. Lebih dari 20 sistem MPL telah diproduksi. Dengan memperhitungkan peningkatan optik dan tingkat perolehan data yang ditingkatkan, empat versi MPL yang berbeda telah digunakan di antara tujuh sistem ARM historis yang dicatat dalam Tabel 1.

Situs ARM menampung sejumlah besar instrumen, dan biasanya bersifat terpencil (menimbulkan masalah inisiatif pemeliharaan yang tepat waktu). Oleh karena itu, kesederhanaan dan kepraktisan instrumen menjadi aset berharga. Kedua karakteristik ini menonjol dalam desain MPL. Keamanan mata memungkinkan pengoperasian sistem otonom tanpa memperhatikan keselamatan pengguna atau pengamat. Ini juga secara tidak langsung berkontribusi pada ukuran paket yang dapat dikelola. Desain transceiver tunggal, yang diperlukan untuk memperluas energi pulsa keluar untuk membuat mata pancaran aman, memungkinkan sistem yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan desain optik lidar pemancar/penerima terpisah yang lebih umum digunakan. Ditampilkan pada Gambar. 1a dan 1b adalah dua versi rumahan MPL, masing-masing, di samping unit skalar multisaluran, catu daya laser, dan komputer yang beroperasi. Konfigurasi pada Gambar. 1a (selanjutnya disebut sebagai V1.0) digunakan melalui empat unit ARM pertama (00, 02, 03, dan 54). Gambar skematik V1.0 dapat ditemukan di Spinhirne et al. (1995). Wadah dasar (sekitar 40 × 40 × 20 cm3) menampung semua komponen optik, yang sebagian besar dipasang di sepanjang bagian dalam panel atasnya. Transceiver diikat di atas bagian luar pelat atas ini, dengan sambungan kabel eksternal diakomodasi di sepanjang pelat bagian belakang. Meskipun sangat stabil, V1.0 terbukti agak besar dan tidak memiliki sarana sederhana untuk beroperasi pada sudut pandang nonzenith. Kekhawatiran ini dibahas dalam desain casing tubular yang ditingkatkan yang ditunjukkan pada Gambar. 1b (V2.0), yang merupakan model yang digunakan untuk instrumen ARM yang lebih baru digunakan (unit 58, 59, dan 72). Kotak optik dasar diganti dengan dua pelat pemasangan: potongan sepanjang 30 cm ditempelkan sedikit pada sumbu diameter 22 cm dari dasar teleskop yang memanjang di belakangnya dan pelat dasar melingkar yang dipasang tegak lurus dengan yang pertama di akhir nya. Segmen yang terhubung ditutupi dengan silinder aluminium. Komponen optik diikat di sepanjang pelat

ekstensi, sementara antarmuka eksternal ditangani di sepanjang permukaan belakang. Cincin putar memperbaiki unit dalam dua tiang penopang dan pelat dasar yang memungkinkan transceiver berputar di atas sudut pandang variabel, yang dapat disesuaikan secara manual sesuai keinginan. Sekrup pengencang di dalam pivot menyesuaikan kekakuan dudukan, sehingga mengencangkan unit di tempatnya ke sudut pandang yang diinginkan. Kalibrasi sistem menjadi lebih mudah dengan manipulasi sederhana dari sudut ini (akan didiskusikan). Total volume paket untuk kedua versi sistem total jauh di bawah 1 m3 . Laser MPL adalah model Spektra Fisika 7300-L3 Nd:YLF yang dipompa dioda, dengan kepala rongga pendek 7960-L3 (1047 nm, 1,0 W) dan modul pengganda frekuensi 7965-L3 (523 nm). Dioda terletak di wadah catu daya laser, dan dipasangkan dengan serat secara eksternal ke kepala. Keuntungan dari laser ini adalah kemampuan untuk frekuensi pengulangan pulsa variabel (PRF) dicapai melalui mekanisme q-switching akustik-optik. Untuk pengoperasian standar, MPL PRF diatur ke2,5 kHz. Pada tingkat ini sekitar 20 mikrojoule perpulsa keluar dari aperture laser langsung. Panjang pulsa kurang dari 10 ns, dan divergensi sinar pada titik ini kira-kira 1,2 mrad, setengah sudut. Detektor adalah modul penghitung foton EG&G SPCM-AQ-100 Geiger mode avalanche photodiode (GAPD) yang dipadamkan secara aktif. Efisiensi kuantum mendekati 70% dengan tingkat penghitungan maksimum mendekati 20 MHz untuk perangkat solid-state ini. Jalur optik MPL "bersama" bertepatan melalui aperture 20 cm, panjang fokus yang dapat disesuaikan, teleskop Schmidt–Cassegrain buatan Celestron. Eksperimen awal dengan MPL koaksial menunjukkan bahwa mempertahankan keselarasan transmisi-terima sangat sulit karena bidang pandang yang dimaksudkan sangat kecil. Dengan teleskop umum dan field-stop, stabilitas keselarasan jauh lebih sedikit masalah. Juga, menemukan "penglihatan membosankan" berkurang dari operasi yang menantang secara teknis menjadi sederhana dalam mengirimkan pulsa pancar ke field-stop penerima. Garis besar desain optik MPL awal dan raytrace sederhana ditunjukkan pada Gambar. 2. Dengan satu pengecualian (akan dibahas), V1.0 dan V2.0 berbagi tata letak yang sama.



Figure 2 Garis besar 2D yang disederhanakan dari desain optik MPL untuk sistem V1.0 dan V2.0 (nomor unit ARM 00, 02, 03, 54, 58, dan 59).

Setiap pulsa diputar dari jalur laser terpisah ke jalur bersama dengan kombinasi cermin miring dan kubus pemisah berkas polarisasi (V1.0) atau polarizer film tipis (V2.0). Lensa positif kemudian memfokuskan sinar ke titik fokus teleskop, di mana lubang jarum 200 m ditempatkan yang mewakili penghentian bidang sistem (yaitu, bukaan pembatas bidang pandang). Pelat depolarisasi pseudorandom yang ditempatkan di luar titik fokus adalah komponen terakhir yang berinteraksi dengan pulsa sebelum ekspansi terkolimasi melalui teleskop berdiameter 20 cm. Idealnya, divergensi pulsa keluar dibatasi difraksi hingga sekitar 35 rad. Namun, pengaburan yang tak terhindarkan menyebabkan nilai terukur menjadi lebih dari 50 rad. Efisiensi transmisi melalui jalur keluar berada di urutan 40%. Energi pulsa yang ditransmisikan keluar rata-rata sekitar 6-8 J, yang berada di dalam ambang batas keamanan mata ANSI 25-J yang dikutip untuk sumber bukaan 20 cm.

Sepanjang jalur terima, panjang fokus teleskop adalah sekitar 1,7m. Mengingat diameter field-stop, bidang pandang penerima kira-kira 120 rad. Pengukuran laboratorium menunjukkan nilai efektifnya lebih dari 100 rad. Bidang pandang yang sangat sempit ini menghilangkan banyak ambiguitas yang diketahui terkait dengan hamburan berganda dari sinyal lidar (Eloranta 1998) dan membatasi deteksi cahaya latar sekitar. Lensa positif di belakang lubang jarum menyatukan hamburan balik yang terpolarisasi secara acak, sebelum melewati perangkat pemecah berkas ke jalur penerimaan yang terpisah. Dua filter interferensi sempit (sekitar 1,2-A˚ lebar spektral gabungan) adalah ditempatkan di depan lensa positif akhir yang memfokuskan energi ke detektor.

Sepanjang bagian bersama dari sumbu optik, pulsa keluar berinteraksi dengan empat permukaan reflektif: lensa positif di depan lubang jarum, tepi luar lubang jarum itu sendiri, depolarisasi acak, dan pelat korektor teleskop. Pantulan mundur dari pulsa keluar dari

permukaan ini secara tidak sengaja mencapai detektor. Signifikansi energi ini cukup untuk sesaat (sekitar 200 ns) menjenuhkan GAPD dengan permulaan setiap periode sampling. Sebuah sinyal run-on dibuat oleh peristiwa ini, yang meluruh secara bertahap melalui panjang periode sampling. Apa yang disebut after-pulse ini memiliki besaran yang cukup besar, dan pasca-pemrosesan data harus memperhitungkannya. Hal ini akan dibahas lebih lanjut dalam bagian 3b. Pengukuran laboratorium telah menunjukkan bahwa hamburan dari lubang jarum memberikan kontribusi yang signifikan terhadap refleksi internal. Oleh karena itu, fokus detektor relatif terhadap lubang jarum digeser sedikit pada tahap penyelarasan akhir sedemikian rupa sehingga pupil keluar sistem (gambar cermin utama teleskop) dicitrakan ke detektor daripada lubang jarum. Namun, ukuran gambar ini lebih besar dibandingkan dengan lubang jarum. Ini berpotensi lebih besar dari luas permukaan aktif GAPD. Dalam kasus seperti itu, area aktif detektor diisi terlalu banyak sehingga titik ini menjadi penghentian medan sistem yang sebenarnya. Bidang pandang penerima sedikit menyempit dalam kasus seperti itu.



Figure 3 Garis besar 2D yang disederhanakan dari desain optik MPL untuk sistem V2.1 (nomor unit ARM 72).

Konfigurasi optik alternatif dapat digunakan untuk membatasi efek dari afterpulsing. Desain seperti itu mengurangi jumlah permukaan reflektif yang berinteraksi dengan pulsa keluar. Lubang jarum dan lensa positif/kolimasi yang sesuai ditarik ke belakang sambungan koaksial jalur bersama. Pulsa masih berinteraksi dengan pelat korektor teleskop dan depolarisasi acak, tetapi kontribusinya pada afterpulsing kurang signifikan. Skema desain ini dirinci pada Gambar. 3. Modifikasi memerlukan peningkatan panjang fokus teleskop (sekitar 2,0 m) untuk mengakomodasi jarak retraksi lubang jarum. Bidang pandang penerima lebih rendah hingga 100 rad, meskipun pengukuran laboratorium menemukan nilai efektif sekitar 90 rad. Perhatikan bahwa titik fokus sistem sekarang harus disetel dua kali, karena sinar keluar tidak lagi berinteraksi dengan lubang jarum. Lensa negatif ditempatkan tepat setelah cermin belok

tetapi sebelum persimpangan jalan untuk mengakomodasi ini. Sebuah kubus pemecah berkas digunakan untuk mengarahkan berkas sinar ke arah depolarisasi dan teleskop. Kombinasi lubang jarum/lensa positif terletak di belakang kubus, menerjemahkan semua cahaya yang masuk ke filter dan detektor seperti pada desain sebelumnya. Karena modifikasi ini secara logistik agak sederhana, sistem V2.0 dapat ditingkatkan dengan upaya yang relatif kecil. Pada Maret 2001 satu unit ARM menampilkan pemutakhiran ini (unit 72, yang sekarang kita sebut V2.1). Sistem tambahan sedang dalam proses upgrade. Perbandingan afterpulsing antara sistem V2.0 dan V2.1 ditampilkan pada Gambar 4; Modifikasi V2.1 secara signifikan menurunkan efeknya dengan urutan besarnya.

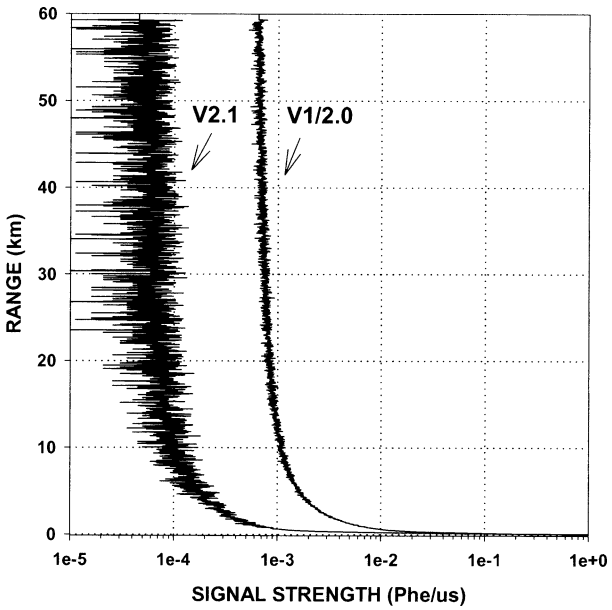


Figure 4 Perbandingan profil sinyal afterpulsing detektor rata-rata 10 menit (rentang sebanding dengan waktu) dari konfigurasi optik asli (V1.0 dan V2.0) dan lubang jarum retraksi (V2.1) yang ditingkatkan dalam resolusi rentang 30 m.

Sistem data MPL terdiri dari paket kartu skalar multisaluran (MCS) buatan SESI, yang dihubungkan melalui kabel serial ke detektor. Outputnya kemudian dibaca melalui kartu akuisisi data PC-DIO-24 National Instruments dan kabel serial oleh paket perangkat lunak berbasis Windows yang dijalankan oleh komputer laptop PC. Dua versi SESI MCS telah ada di antara unit ARM. Versi sebelumnya mengizinkan periode pengambilan sampel rentang statis 2 s (resolusi vertikal 300 m) dan tidak lagi digunakan. Model saat ini memungkinkan pengaturan variabel pengguna 300, 150, 75 dan 30 m sebagaimana diatur melalui antarmuka perangkat lunak. Sistem ARM yang dilengkapi dengan MCS ini biasanya menggunakan pengaturan resolusi maksimum 30 m. Tiga sistem ARM pertama (00, 02, dan 03) awalnya

dilengkapi dengan MCS resolusi rendah. Tiga yang terakhir (54, 58, 59, dan 72) menampilkan model yang diperbarui (perhatikan bahwa skema penomoran sistem yang agak misterius bergantung pada fitur ini, karena sistem dengan resolusi lebih tinggi hanya memiliki nilai 50 ditambahkan ke aslinya. nomor unit). Pada PRF 2,5 kHz, ada 400 s antara pulsa berurutan, memungkinkan jangkauan data maksimum 60 km. Pengaturan antarmuka perangkat lunak memungkinkan pengguna untuk memutuskan berapa banyak data ini yang akan disimpan ke file output mentah. Opsi ini penting untuk menghitung jumlah penghitungan latar belakang sekitar yang bertahan selama sampel bidikan, yang akan dijelaskan lebih lanjut di bagian 3c. Spinhirne (1993) menunjukkan bahwa penjumlahan pulsa diperlukan untuk mencapai rasio signal-to-noise yang cukup besar, mengingat energi pulsa keluar yang rendah. Pengaturan perangkat lunak memungkinkan pengguna untuk menentukan interval rata-rata sampel di mana jumlah foton per nampan rentang disimpan dalam file data. Sistem ARM secara historis telah diatur ke 30 atau 60 detik. Pembacaan suhu relai MCS dari tiga termistor yang dipasang di dalam tabung optik. Pembacaan tegangan dari monitor energi yang dipasang di depan bukaan laser ditransmisikan dan kemudian diubah menjadi mikrojoule menggunakan tabel pencarian yang dikalibrasi untuk setiap sistem. Pembacaan intensitas periode pengambilan sampel tinggi ditampilkan secara real time di layar PC, bersama dengan diagnostik sistem.