ارتباط با کره ماه بوسیله امواج میلیمتری

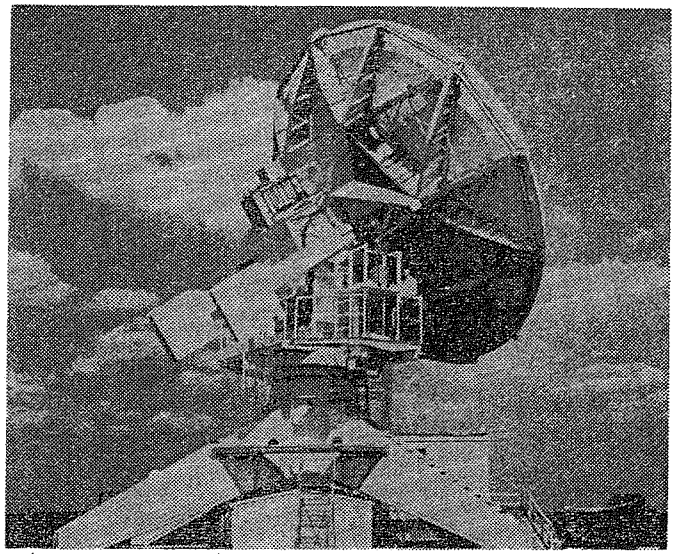
J. J. G. McCUE and E. A. CROCKER
MIT Lincoln Laboratory, Lexington, Mass.
از : microwave journal

ترجمه از : مهندس محمود زارع

در حدود ده سال قبل آزمایشگاه لینکلن در دانشگاه M.I.T آمریکا بفکر ساختمان یکدستگاه رادار برای ارتباط با کرهٔ ماه و با استفاده از امواج میلیمتری افتاد . انتخاب امواج باین کوتاهی دارای دو مزیت میباشد اول وجود پهنای باند کافی برای جلوگیری از تراکم کانالها و دیگری افزایش بازده توجیهی آنتن و باریك شدن گلبرگ پترن آن. ایندو خاصیت برای ارتباط میان نقاط فضائی بسیار دور ازهم وافزایش قابلیت تشخیص رادار بسیار سودمند است .

آنتنی که مورد استفاده میبایست قرار گیرد دارای صفحه انعکاسی بشکل سهمی‌دوار بقطر لااقل هزار طول موج میبود . چنین صفحه‌ای تا فرکانس ۳۵ کیلومگا سیکل هم بخوبی عمل میکند . در ساختمان صفحه انعکاس آنتن ازیك قانون فیزیکی استفاده شد که تا آنموقع فقط جنبهٔ نظری آن بکار برده میشد . یك سطل آب را در نظر میگیریم که بدور محور خود باسرعت زاویه‌ای (ω) چرخش کند چون ذرات سطح مایع در مقابل نیروی مماسی که بوجود میآید نمیتوانند مقاومت کنند در نتیجه باید بشکلی در آید که منتجه نیروهائیکه توسط ذرات جانبی روی یك ذرهٔ مورد نظر آب وارد میشود عمود برسطح مایع باشد . این نیروها با نیروی جاذبه ذره مورد نظر ترکیب شده تشکیل نیروی متوجه مرکز را میدهد که برای چرخش مایع لازم میباشد . این شرط وقتی برقرار میشود که فصل مشترك صفحه قائمی که از محور چرخش میگذرد با سطح مایع با معادله $y=\frac{\omega^2}{2g}x^2$ مشخص گردد بعبارت دیگر سطح مایع بصورت یك سهمی‌دوار باید باشد با استفاده از این خاصیت یك مخزن پلاستیکی پر از جیوه که با سرعت زاویه‌ای ثابت ω چرخش میکند بمنظور سطح انعکاس آنتن مورد استفاده قرار گرفت. چون ثابت ماندن سرعت صفحه اهمیت زیاد دارد بکمك مهندسین سرومکانیزم آزمایشگاه لینکلن این مسئله حل شد و یك سطح سهمی شکل دوار باقطر ۷/٤ متر و با فاصلهٔ کانونی ۳/٦ متر ساخته شد . یك قشر نازك روی درجه هدایت سطح انعکاس را بمیزان لازم برای انعکاس امواج میرساند، مخزن پلاستیکی در روی یك قالب ازجنس Fiberglass قراردارد. این قالب توسط میله‌هائی از آلومینیوم که بشکل ستاره ساخته شده است درجای خود مستقر میشود. روکش روی توسط رنگ سفید محفوظ شده است بقسمیکه آنتن مذکور هفت زمستان را پشت سر گزارده است بدون آنکه عیبی کرده باشد (شکل ۱)

درشکل (۲) خط تغذیه نشان داده شده است. بجای آنکه انتهای لوله انتقال که بر أس سطح انعکاس آنتن میرسد بشکل بوق باشد بمقدار ۵ سانتیمتر از رأس گذشته و در حدود ۳ سانتیمتر پشت یك صفحه آلومینیوم بقطر ۱۲ سانتیمتر منتهی میشود. این صفحه بارو کشی



شکل(۱) ـ دستگاه رادار برای ارتباط باماه توسط امواج ۸/۶ میلیمتری

ازمس پوشانده شده است . تصویر نقطه انتهای لوله انتقال انرژی نسبت به صفحه آلومی نیوم که صفحه انعکاس ثانوی نامدارد نقطه‌ایست که در موقع تنظیم آنتن باید بر کانون سهمی‌دوار منطبق شود . چون تلفات درخط انتقال انرژی درفرکانس ۳۵ کیلومگاسیکل نسبتاً زیاد و در حدود DB ۳۳/. در متر میباشد . مولد امواج درمحفظه‌ای بلافاصله پشت سطح انعکاس قرار گرفته است تا لواه انتقال لازم حتی‌الامکان کوتاه باشد . نظر باینکه فاصله کانونی سهمی‌دوار ۳/۶ متر است طول لوله انتقال میان لوله امواج تا نقطه انتهای لوله درحدود ۳/۹ متر بایدباشد. سطح لوله دایره‌شکل است باینترتیب میتوان هر نوع پلاریزاسیون که مورد نظر باشد بوجود آورد . اگر لولهٔ انتقال بقسمی انتخاب شود که فقط امواج اصلی را بوجود آورد درفرکانس مورد نظر (۳۵ کیلومگاسیکل) قطر لوله در حدود ۶/۵ می‌لیمتر میشود و تلفات کلی لوله درحدود DB ۱/۲ است، اولین بار که این آنتن طرح شد (۱۹۶۱) برای جلوگیری از این تلفات قطر مقطع لوله بزرگ در حدود ۹ می‌لیمتر انتخاب شد . لوله از نقره درست شده بود ودرطول ۳/۹ متر تلفات آن DB ۰/۹ بود . تلفات لوله‌مسی که آب نقره داده‌شده باشد در حدود DB ۱/٤ میباشد . با استفاده از پلاریزاسیون افقی در فرکانس ۳۵ جیگاسیکل (کیلومگاسیکل) بازده توجیهی آنتن (شامل لوله انتقال انرژی) DB ۶۷/۵ میباشد . باینترتیب بهره آنتن (بدون در نظر گرفتن تلفات لوله انتقال انرژی) پنجاه وپنج درصد میشود .

درسال ۱۹۶۳ آنتن فوق‌الذکر برای اندازه گیری قابلیت انعکاس ماه دربرابر امواج می‌لیمتری مورد استفاده قرار گرفت . پهنای شعاع امواج ۰/. درجه یعنی برابر با یکدهم زاویه ماه ازسطح زمین میباشد. بواسطهٔ بازده توجیهی زیاد آنتن بوسیلهٔ یك فرستنده قدرت ۱۲ وات که از نوسانساز کلایسترون استفاده میکرد از کرهٔ ماه انعکاس دریافت شد . گیرندهٔ رادار یك ایستگاه سوپرهترودین با باندی بپهنای ۱۷۰ سیکل بود . برای تثبیت فرکانس فرستنده از یك نوسان‌ساز کریستالی (نوسانسازی که فرکانس آن توسط یك کریستال کنترول میشود) استفاده شده‌است. طول ضربان مورد استفاده ۲/٤ ثانیه (زمان لازم برای رفت و برگشت یك موج به ماه) میباشد .

برای افزایش نسبت $\frac{\text{شدت خبر}}{\text{شدت همهمه}}$ میبایست قدرت فرستنده را افزود .

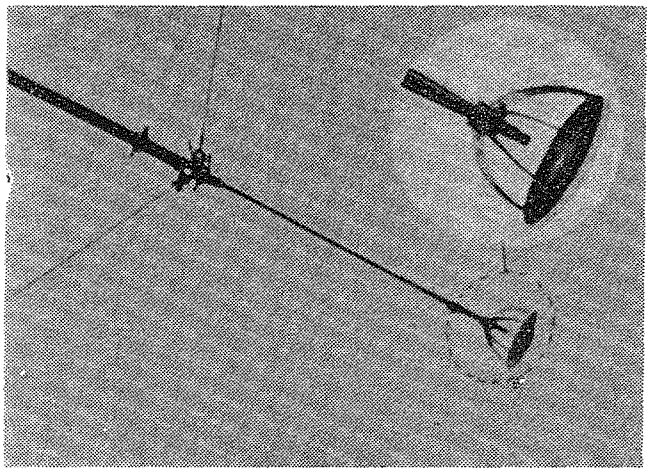
در سال ۱۹۶۵ ادارهٔ ملی فضائی آمریکا (NASA) بمنظور اصلاح دراندازه گیری خاصیت انعکاس ماه

که مربوط به برنامهٔ آپولو میشد ـ بودجه مربوط به پروژهٔ رادار کرهٔ ماه را تقویت نمود . در همین زمان (کلایسترون) تقویت کننده باقدرت خروجی یك کیلووات و بازده خوب دربازار موجود بود و با استفاده ازآن احتیاجی به‌نوسان‌سازجداگانه نبود. باینترتیب‌مدارتثبیت‌فرکانس(بوسیلهٔسیگنال کنترول) هم که بالا بآن اشاره شد دیگر لزومی نداشت .

اوائـل سال ۱۹۶۶ شرکت (واریان) اقدام بساختمان‌یك کلایسترون‌بابهرهٔ DB ۴۷ درفرکانس ۳۴/۵۶(جیگاسیکل) وقدرت می‌نیوم خروجی ۷۰۰ وات کرد . بدلیلی که بعداً بآن اشاره خواهدشدلازم بود که‌پهنای‌باند به۱۰سیکل کاهش‌داده‌شودباینترتیب ضریب تثبیت فرکانس‌میبایست درحدود 10^{-10} باشد همچنین لازم بود که HASH (قسمت بدون استفاده طیف فرکانس‌سیگنال)طیف که‌در نتیجه مودولاسیون فاز بوجود میآید DB ۱۵ ـ یا کمتر نسبت به‌سیگنال باشد. بعلت‌لزوم فرکانس ثابت‌پیشنهاد شد که‌فرکانس منبع کریستالی MC ۵ باشد . برای رسیدن به ۳۵ GCمیبایست‌طبقات‌تضریب فرکانس۷۰۰۰بارفرکانس نوسانات‌اصلی‌را‌بزرگ کند.در نتیجه مودولاسیون‌فاز $(۷۰۰۰)^{۲}$ برابر(درحدود DB۷۷)میشد . باینترتیب مودولاسیون فازمنبع MC ۵ میبایست لااقلDB ۹۲ ضعیف‌ترازسیگنال‌باشد. شرکتHewlett packard منبعMC۵را‌باتغییری‌درنوسان‌ساز کوارتزیDB۱۰۷ ساخت Sylvania هم طبقات تضریب فرکانس را با استفاده‌ازدیودوترانزیستور ساخت. ضریب‌این‌طبقات برابر با $۲^{۸} \times ۳^{۸} = ۶۹۱۲$ بود . در نتیجه فرکانس سیگنال برابر با GC ۳۴/۵۶ میشود .

بمنظورقطع‌منبع‌سیگنال در زمان دریافت‌انعکاس کافیست که‌طبقات تضریب‌فرکانس‌را از کار انداخت. درنتیجه قدرت نوسان سازمحلی باید توسط یك مدار تضریب دیگری که بافرکانس ۵/۰۰۴۳ مگاسیگل تحریك میشود تهیه شود . پس از تضریب فرکانس حاصل بمقدار ۳۰ مـگاسیکل بـافـرکانس سیگنال اختلات دارد طبقهٔ اول مدار تضریب عبارتست ازیك مدار که فرکانس را هشت برابر میکند و یك مدار دیگر که‌فرکانس‌را چهاربرابر میکند در این‌طبقات از دیود استفاده میشود . سپس یك طبقه تقویت برای فرکانس ۱۶۰ مگاسیکل قدرت سیگنال را به ۲۰ وات میرسانـد . سپس سیگنال بوسیلهٔ دیـود های **وراکتور** سه‌بار دوبرابروسه‌بارسه‌برابر میشودتوان **سیگنال** نوسان‌سازپنج مگاسیکل درحدود ده هزارم وات و درفرکانس۳۵ کیلومگاسیکل قدرت‌خروجی صد هزارم وات‌میباشد . باینترتیب فرستنده عبارتست ازسه واحد اصلی: نوسان ساز کوارتز(که همهمه‌اش بسیار کمست)، طبقات تضریب فرکانس، وطبقه‌تقویت (**کلایسترون**) . این کلایسترون دارای شش محفظهٔ نوسان است . ضریب تقویت آن DB ۵۰ یا بیشتر است (بستگی به تنظیم آن دارد) . قدرت خروجی آن یك کیلووات و ولتاژش ۱۲ کیلوولت و شدت جریان در آن یك آمپر است . بمنظور محافظت **کلایسترون** وجلوگیری از ایجاد جرقه‌در پنجره کلایسترون‌یك آشکار ساز **فوتوالکتریك** از درون یك لوله پنجرهٔ کلایسترون‌را کنترول میکند.هر گاه قوسی‌درپنجره بوجودآید درفاصله زمان‌پنج‌ملیونیم‌ثانیه‌توان‌ورودی به **کلایسترون** قطع میشود . پس از ساخته شدن **کلایسترون** با توان یك کیلووات مسئله‌ای که‌بنظر مهم میآمد لوله انتقال انرژی در آنتن بود . افت‌این لوله DB ۱/۴ بود وبرای‌قدرت‌ورودی یك کیلووات تلفات گرمائی در لوله در حدود ۲۷۵ وات میباشد . این تلفات بهیچوجه قابل تحمل نیست . یك راه حل کوتاه کرد **زمان عمل** (Duty cycle)دستگاهست. این راه حل مطلوب نیست زیرا در موقع آزمایش‌هر قدر امواج پیوسته‌تر باشند کاربا آنها بهتر است . راه

دیگر که عملی‌تر بنظر میآید بزرك کردن سطح مقطع لوله انتقالست . این لوله از درون سوراخهائی که در داخل پایهٔ آنتن قرار دارد میگذشت و بزرگترین قطر مورد استفاده ۱۲ می‌لیمتر میباشد . در نتیجه دهانهٔ روبروی صفحه انعکاس ثانوی لزوماً باید باقطر ۸/۵ می‌لیمتر بماند تاسطح تابش روی صفحه انعکاس اصلی تغییر نکند . متخصصین مربوط اظهار داشتند که بزرگ کردن مقطع لوله یا باریك کردن دهانه خروجی ایجاد امواجی غیراز موج اصلی میکندزیرا طول لوله برحسب طول موج بسیار زیاداست. باوجود این مقطع لوله را بزرك کردیم .



شکل(۲) ـ خط تغذیهٔ آنتن

درفرکانس ۳۵ کیلومگاسیکل درلوله گرد باقطر مقطع ۱۲ می‌لیمتر ۶ موج میتواند بوجود آید . سه موج آن بواسطهٔ کوچك کردن مقطع در مقابل دهانهٔ باریك صفحه انعکاس ثانوی خفه میشوند ، باوجود این اندازه گیرهای بعدی نشانداد که تلفات در خط در حدود ۰/۷DB، تا ۰/۸DB. بوده و ازیك کیلووات قدرت کمتر از ۱۳۰ وات در لوله تلف میشود و این مقدار اثر مهمی درکار دستگاه ندارد .

درابتدای کار(پیش ازبکاربردن منبع کیلووات) صفحهٔ انعکاس ثانوی توسط یك پوسته بشکل نیمکره که ازپلاستیك بادرجه‌ذوب زیادساخته‌شده بود نگهداشته میشد . صفحهٔ انعکاس در خط استوای نیمکره قرار داشت و لولهٔ تغذیه‌ازقطب آن میگذشت . پس ازقرار دادن منبع یك کیلووات نیمکرهٔ پلاستیکی ذوب شد وبجای آن چهار بازوی برنجی برای نگهداری صفحهٔ انعکاس ثانوی بکار برده شد (شکل ۲) . چهار بازو وصفحهٔ انعکاس ثانوی توسط یك صفحهٔ گرد (ازجنس Teflon) که دهانه رامی‌بندد محفوظ میشود. فاصلهٔ میان انتهای لولهٔ انتقال وصفحهٔ گردانعکاس بقسمی است که ضریب موج ساکن ولتاژ درفرکانس ۳٤/٦۵ جیگاسیکل کمتر از ۱/۰۵ باشد .

برای تنظیم لوله تغذیه آنتن (نسبت بصفحهٔ انعکاس اصلی) ازیك فرستنده که در فاصلهٔ ۱۰ کیلومتری در بالای یك برج آب قرار داشت استفاده شد و سپس بمنظور تنظیم آنتن برای نقطه بینهایت لوله تغذیه بمقدار ۲ میلمتر تغییر مکان داده‌شد .

وضع آنتن توسط یکدستگاه **اپتیکی** هفده‌قطعه درامتداد افقی وقائم تعیین‌میشود بکمك وسیلهٔ مذکور امکان دارد که آنتن را در امتداد هدف نامرئی با اشتباهات کمتر از پهنای شعاع موج آنتن نشانه گیری کرد . برای نشانه گیری بسوی ماه استفاده ازچشم مناسبتر بنظر میرسد : صفحهٔ انعکاس آنتن دارای دو سوراخ هریك بقطر ۱۰ سانتیمتر میباشد . در پشت یکی از این سوراخها یك دوربین تلویزیون با مدار بسته وجود دارد که از طریق یك تلسکوپ درامتداد خطی بموازات محور آنتن قرار گرفته است . در روی پنجره داخل تلسکوپ دو دایره رسم شده است .

یکی ازآنها باندازه مقطع شعاع موجی است که پخش میشود وسوراخ دیگر تقریباً باندازهٔ قرص ماه است . در کنار آنتن یك منبع نور موجود است با تغییر وضع تلسکوپ میتوان نور این منبع راروی

مرکز پنجرهٔ تلسکوپ آورد تا تلسکوپ بامحور آنتن موازی گردد، ضریب انکسار فضای اطراف زمین برای نور و امواج می‌لیمتری یکسان نیست . در زمستان این عدم تساوی ناچیز است ولی در تابستان قابل اهمیت میباشد رطوبت هوا نیز باعث اختلاف ضریب انکسار امواج می‌لیمتری با نور میشود عمل نشانه گیری آنتن از نظر مکانیکی پایدار است و این موضوع را توسط یك رادیومتر که به آنتن وصل شده است میتوان بررسی کرد . برای اینعمل باید حاشیه کره ماه را بوسیلهٔ تلویزیون مداربسته مشاهده نمود .

ارتفاع برد آنتن برای آزمایش ۰/۲۲ درجه است در ارتفاعی که اجسام آسمانی مشاهده میشوند (۵ درجه یا بیشتر) امواج سانتیمتری و نور مرئی دارای ضریب انکسار مساوی هستند و با اطمینان خاطر میتوان از تلسکوپ استفاده نمود. ولی برای ارتباط میان دو نقطه در روی زمین اختلاف ضریب انکسار بین دو نوع موج مذکور دارای اهمیت میباشد. برای یك صفحه انعکاس بشکل سهمی دوار ضریب انکساریکه امواج می‌لیمتری را باندازه پهنای یك دسته شعاع منحرف میکند شدت سیگنال رادر حدود ۱۵DB تا ۲۰DB ضعیف میکند و گیرنده رادارسوپرهترودین دارای سه طبقه تغیر فرکانس ویك Mixer که ضریب همهمهٔ آن برای یك سیگنالی که فقط دریك باند کناری قراردارد ۱۲/۵DB میباشد اولین فرکانس واسط (IF) ۳۰ مگاسیکل و دومی ۲/۲۱۵ مگاسیکل سومی ۲/۵۰۰ کیلوسیکل میباشد .

هنگامیکه ماه درافق زمین پدیدار میشود گردش زمین مشاهده کننده روی زمین را با سرعت چندصد کیلومتر در ساعت بطرف ماه حرکت میدهد . در موقع غروب ماه عمل عکس انجام میگیرد . فاصلهٔ مشاهده کننده ازماه هم تغییر میکند زیرامدار آن به‌دور زمین دائره شکل نیست باینلائل که ذکرشد انعکاس از ماه اثر Doppler ایجاد میکنند . چون بمنظور کم کردن همهمه پنهای باند باریك مورد نیاز است اثر دائماً متغیر Doppler اشکال زیادی ایجاد میکند. اثر Doppler برای قسمتهای مختلف سطح ماه برابر نیست و بطوریکه اززمین دیده میشود ماه دارای حرکت **گهواره‌ای** میباشد .

انعکاس موجی بفرکانس KMC ۳۵ ازدوحاشیه مقابل هم ماه ممکنست در حدود یك کیلوسیکل باهم اختلاف فرکانس داشته باشند پهنای شعاع موج یکدهم پهنای ماه میباشد باینترتیب پهنای باند گیرنده باید در حدود ۱۰۰ سیکل باشد با در نظر گرفتن خطاهائی که ممکنست دراثر تغییرات فرکانس بوجود آید فرکانس ۲/۵۰۰ کیلوسیکل IF دارای یك پهنای باند ۱۷۰ سیکل می‌باشد . اگر اثر Doppler خطای ۸۵ سیکل بوجود آورد در اندازه گیری شدت موج ممکنست ۵۰٪ اشتباه بوجود آید چون اثر Doppler ممکنست تا حدود ۷۰ KC باشد اصلاح این خطا بسیاردشوار میباشد .

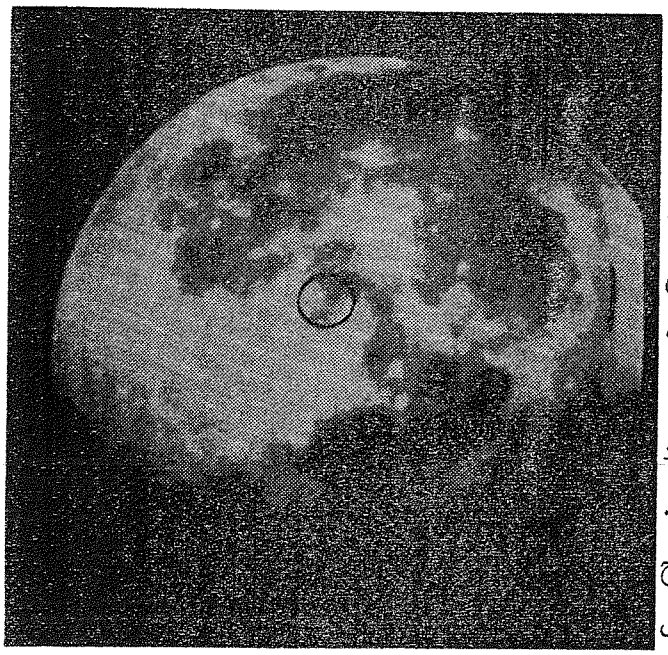
با برنامه‌ریزی روی نوسان سازمحلی شماره ۲ میتوان اثر Doppler راخنثی نمود این نوسان ساز (Hp5 100A) عبارت از یك Synthesizer فرکانس است که در حوالی ۲۸ مگاسیکل نوسان میکند. بکمك برنامه‌ریزی روی این نوسان ساز فرکانس آن ۵۰ سیکل به ۵۰ سیکل تغییر میکند این تغییرات پله‌ای فرکانس هم آهنگ با سوراخهای یك نوار کاغذی میباشد که توسط خروجی یك ماشین محاسبه الکترونیکی تهیه شده است. خروجی ماشین محاسبه فرکانس . Syny را در هر دقیقه تعیین میکند . در اینموقع رادار متوجه مرکز قرص ماه است. برای نشانه گیری بنقاط دیگر قرص ماه خروجی گیرنده ازدرون یك صافی شانه‌ای (که دارای چندین باند گذرا هریك بپهنای ۱۷۰ سیکل است) میگذرد. خروجی صافی وارد یك دستگاه ثبات که دارای چند قلم ثبت میباشد میگردد. هنگامیکه فرکانس ورودی

بصافی ۲/۵ کیلوسیکل است . انحراف قلمهای مربوط به فرکانسهای ۲/٤ و ۲/۵ و ۲/٦ کیلوسیکل یکسان است . یـك انعکاس از کرهٔ ماه انحراف یکسان روی سه قلم ایجادمیکند نوسان‌سازمحلی‌شماره۲ اثر Doppler راخنثی کرده است . البته لازم نیست که نوسان‌سازدقیقاًتنظیم‌شده‌باشد زیرا ازنسبت انحرافات قلمهای۲/٤ و۲/٦ کیلوسیکل میتوان‌انحراف از۲/۵ کیلوسیکل را نتیجه گرفت . روش عمل آنست که ابتدا آنتن را بوسط قرص ماه نشانه گیری میکنند و سپس باراهنمائی‌صافی‌شانه‌ای‌فرکانس‌نوسان‌سازمحلی شماره ۲ را نسبت به‌مقدار برنامه ریزی شده منحرف میکنند .

اصلاح قابلیت‌تشخیص دستگاه رادار با کوتاه کردن طول ضربان در مورد فرستنده یك کیلوواتی قابل‌اجرا نیست باینجهت همان‌طول ۲/٤ ثانیه برای ضربان بکار رفته است مزیت ضربان‌بلندآنست که میتوان عمل باز و بسته کردن دستگاه را بوسیلهٔ یك لوله انتقال‌انرژی وباکنترول ازدور انجام داد .

هنگامیکه آنتن بطرف نقطهٔ دلخواه از کرهٔماه نشانه گیری‌میشود کلیدی‌رافشارمیدهند درنتیجه‌طبقه تضریب‌فرستنده بکمك یك‌مدار بنام Sequencer قطع میشود ویك‌بارالکتریکی‌میان دوسرخروجی‌فرستنده قرارمیگیرددرهمین‌موقع آنتن‌به گیرنده‌متصل‌میشود این اعمال بطور متناوب درمدت ٤۰ ثانیه ادامه دارد سپس یکدستگاه چاپ IBM کارتی‌را بیرون میدهد . ۱/۲ ثانیه‌پس‌از آنکه‌فرستنده‌قطع‌شد قسمت میانهٔموج فرستاده شده از سطح مـاه منعکس میگردد . عکسی مانندشکل(۳) با یك شماره سری ظاهر میشود شماره سری ، تاریخ وساعت روز ، زوایای افقی و قائم‌موج قدرت فرستاده‌شده‌قدرتهای خروجی گیرنده‌دوکانالی که با پلاریزاسیون قائم‌کار میکند وهمهمه گیرنده‌و عکس‌العمل گیرنده‌درمقابل‌لامپ‌همهمه درروی‌کارت IBM یادداشت میشود .

دستگاه‌رادارمشروح‌در بالا بمنظوراندازه گیری قابلیت انعکاس کره ماه نسبت به امواج می‌لیمتری ساخته شده است بواسطهٔ کوچك بودن طول موج‌تنها ذرات مادی‌سطح‌خارجی‌ماه امواج را منعکس‌میکنند با مقایسهٔ نتایج اندازه گیری با این دستگاه ونتایجی که‌ازرادارهای باموج‌بلندتر بدست آمده است‌میتوان اطلاعاتی راجع به تغییرات جنس‌ماده تشکیل دهنده پوسته ماه بدست آورد. مساحت کرهٔماه بوسیله‌پهنای موج تابش اندازه گیری میشود . بـرای اینکار از تلویزیونی که درآنتن نصب شده است استفاده شده و از قرص ماه عکس برداری میشود (شکل ۳)



شکل(۳) ـ دائره کوچك در روی تصویرماه شعاع ۳DB رادار میباشد