

[研究]

開口合成を利用したマイクロ波ラジオメータによる熱雑音イメージング

Imaging of Thermal Emission using Synthetic Microwave Radiometer

小見山 耕司
K. KOMIYAMA

We are developing a prototype radiometer for two-dimensional passive microwave imaging experiments based on supersynthesis technique. For the confirmation of supersynthesis technique and sensitivity of the radiometer, one-dimensional imaging experiments were done using a microwave interferometer in 6GHz band. Rotational scanning is adopted for simplicity of operation instead of the fundamental linear scanning.

Two kinds of targets were used including a point target and an extended target. The images are retrieved by supersynthesis. The peaked image of the point target shows the efficient process of the synthesis and the fine contrast of the building wall and the sky in the extended target implies high sensitivity of the radiometer for detecting lower brightness temperature than 300K.

Two dimensional imaging radiometer is now under test. A retrieved image obtained in the preliminary test is shown and the response of the supersynthesis to continuous brightness distribution is evaluated.

§1 はじめに

電磁波の空間場計測では、散乱計やレーダーのようにコヒーレントな信号の反射・散乱を計測するセンサシステム以外に、熱的放射雑音のようなインコヒーレントな信号を受信してその強度（電力）を測定するマイクロ波ラジオメータがある。空間的な放射分布を測定する地球観測用マイクロ波ラジオメータは、単一アンテナ方式では空間分解能がその物理的なビーム幅と距離の積によって決められるため、大型のアンテナを採用しなければ十分に細かい空間分解能が得られない。観測周波数が低く、すなわち波長が長い場合には同じアンテナサイズでもビーム幅が細くならないので、アンテナに対する要求が一層厳しく、実用的な人工衛星搭載ラジオメータシステムが実現されていない原因となっている。ラジオメータ割り当て周波数バンドである1.4GHzにおいて

は波長が 21cmと長いので、地表面の植生などを透過して直接に地表面を観測できるため、土壌の含水率センサーとして期待されているが、逆にその長波長ゆえに観測システムとしては空間分解能が望めなかった。この欠点を解消すべく、各国の宇宙機関によって人工衛星からの地球観測用にマイクロ波干渉計を利用した開口合成型のラジオメータの研究が行われている^{1,2)}。当所では電波天文に倣って、干渉計のターゲットに対する相対移動を利用して、飛翔体の移動方向に空間分解能を得る超合成マイクロ波ラジオメータを提案し、モデル実験を行ってきた^{3,4)}。

一般に、開口合成ラジオメータは、地表から放射される広帯域で無相関な熱雑音放射を周波数制限によりある程度の空間に渡って相関をもたせ、その空間分布をマイクロ波干渉計により測定し、逆変換処理により放射源である地表の輝度温度分布を得る。空間分布は、空間的に広く配置した複数個のマイク

口波干渉計により得られるが、超合成方式では、地表面ターゲットに対する干渉計の相対移動を利用してプラットフォームの移動方向に干渉計複素相関関数（ビジビリティ関数）を得て、開口合成により空間分解能を得る。筆者はこれまで、フィールド実験用2次元イメージングラジオメータ実験装置を開発してきた。これに先立ち、超合成原理の検証と実験装置の機能評価のため、2個のアンテナと1個の相関器を組み合わせた単一のマイクロ波干渉計を試作し、常温付近の輝度温度を有する物体を対象に超合成1次元イメージング実験を回転走査⁴⁾により行い、その感度と超合成プロセスの検証を行ったので報告する。また、プロトタイプ2次元イメージングラジオメータのフィールド実験についても、実験開始直後であるため予備実験程度の結果にとどまっているが、紹介する。

§2 超合成マイクロ波ラジオメータ

2.1 超合成原理

電波天文での超合成法は、地上に固定された干渉計が、地球の自転と共に天体に対して相対移動をすることによる、相関出力の変化を利用して像合成を行うものである⁵⁾。この原理を図1に示す。地上にマイクロ波干渉計の2個のアンテナが置かれているとする。星や星雲など観測対象の天体は、地球の大きさと比較しても十分遠方にあるので、2個のアンテナの

うち片方を固定して位相基準と考え、他方のアンテナがその基準の周りで回転するとみなせる。北半球にアンテナを設置する場合には、北極星付近の天体をこのような構成で観測できることになる。干渉計の相関出力はビジビリティ関数と呼ばれ、地球の自転によって、超合成法ではアンテナの位置を地上で動かさなくとも、アンテナ相対位置の座標上で図1右のような円形のビジビリティ関数を得る。電波天文では更にアンテナの間隔を変えて測定したり、同時に複数の異なるアンテナ間隔の干渉計を用いることにより、異なる半径のビジビリティ関数を得られるので、2次元的に密なビジビリティ関数を用いて天体像を再生できる。

2.2 1次元超合成原理と構成

天体観測における地球の自転のような大規模な運動系のみならず、さらに小規模な運動系にこの方法を適用することも可能である。宇宙からの地球観測では静止軌道と周回軌道の2通りがあるが、低軌道衛星からの地球観測では地表との相対移動があるので超合成が可能である。しかし、人工衛星の運動がほぼ1次元であるため、軌道に沿った方向でのみ超合成法が可能である。この1次元超合成の説明のために人工衛星軌道を含む垂直面を考えることにする。図2に地球観測用の超合成マイクロ波ラジオメータの原理を示す。超合成ラジオメータに用いるマイクロ波干渉計は、基本的に2個のマイクロ波受信機と相関器により構成される。鉛直方向に角度 α の基線をもつアンテナ配置の干渉計が人工衛星のようなプラットフォームに搭載されているとする。地表面はほぼ常温の空間的に連続な雑音源であるが、これを互いに無相関の無数の点波源の集合と考えると、地表面のイメージングについては図に示すように代表的な1個の点波源ターゲットについて考察すればよい。干渉計が地表面に対して水平に空間移動をする場合、観測対象である点波源の熱的放射信号は、干渉計との相対位置によりアンテナに入射する位相と振幅が変動することになる。ターゲットから見た干渉計の規格化した位置ベクトルと干渉計基線ベクトルは、それぞれ $(x, h)/\sqrt{x^2 + h^2}$ と $(-d\sin\alpha, d\cos\alpha)$ である。したがって、2個のアンテナに入射する位相差はこれらのベクトルの内積、すなわち、通路長差から

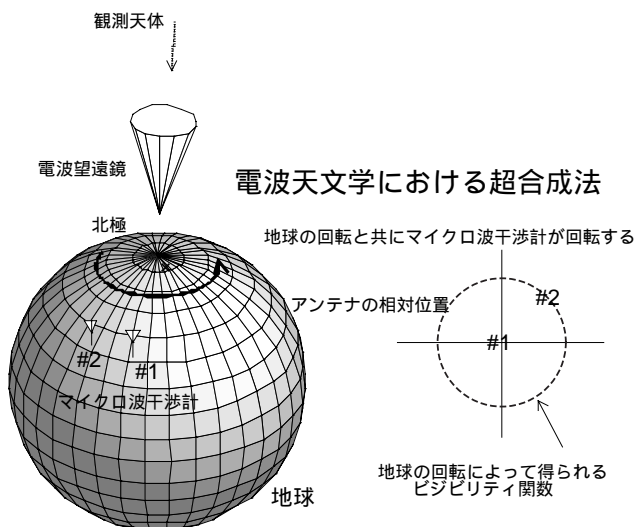


図1 電波天文における超合成法

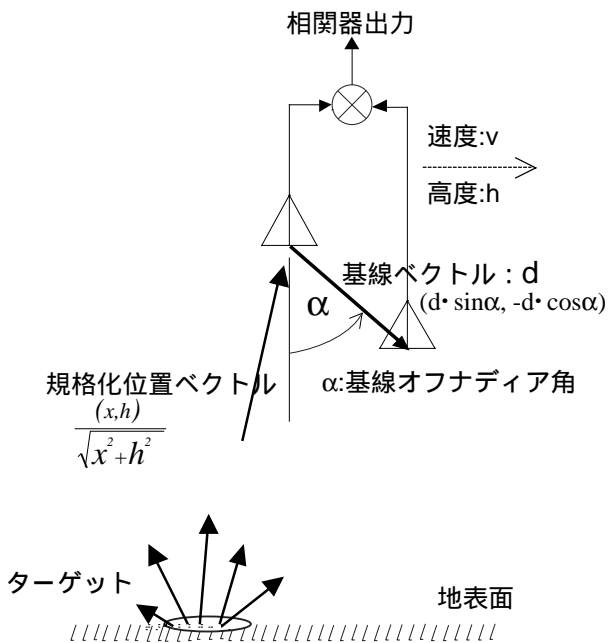


図2 超合成マイクロ波ラジオメータの地表面観測原理

$$\phi(t) = \frac{kd(h \cdot \cos \alpha - x \cdot \sin \alpha)}{\sqrt{x^2 + h^2}} \quad (1)$$

のように記述できる。ここに、 k, d, h と x はそれぞれ波数、基線長、プラットフォームの高度、干渉計の水平位置である。基本的な理解のために、基線オフナディア角がゼロで位置 x が高度 h に比べて小さい場合

を考えると、位相 $\phi(t)$ は $kd \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right]$ のように近似

できる。位置 x は等速度運動をしているプラットフォームでは時間に比例するので、位相は時間の2次関数である。この場合、位相の時間微分である周波数は時間に比例し、その信号はリニアFM(チャープ)信号であるとみなすことができる。すなわち、アンテナ信号は相関器により複素相関がとられ、位相変化及び周波数変化を伴うビジビリティ関数となる。

1個の点波源に対して、干渉計基線オフナディア角が45度の場合のビジビリティ関数を、位相のみを考慮し計算すると、図3(A)のように周波数が変化するビジビリティ関数を得る。図は複素ビジビリティ関数の実部のみを示しており、虚数部は直交する成分である。点波源は時刻ゼロにある。波形変化が明確になるように50波長の短い干渉計基線の計算例を示

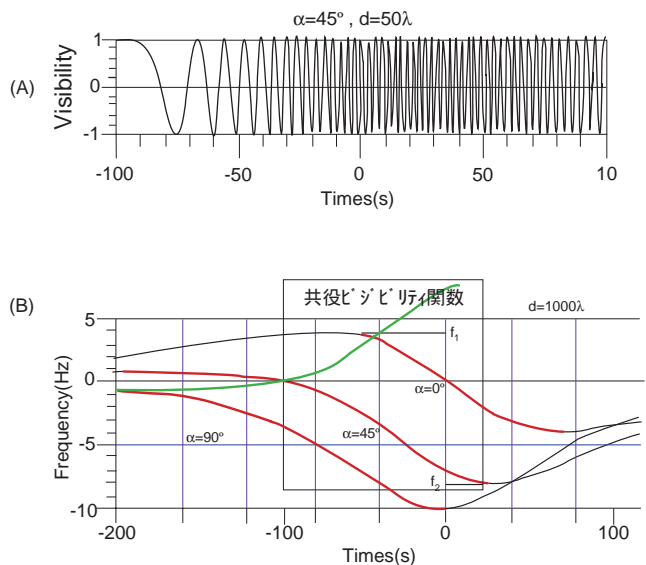


図3 超合成ラジオメータのビジビリティ関数 (A) 計算例(実部) (B) 周波数変化特性($d=1000\lambda$)

している。この図から時間と共に周期が変化し周波数が変動している様子が見られる。図3(B)には、この周波数の変化を基線オフナディア角をパラメータにして描いた3本の特性を示す。オフナディア角がゼロは垂直基線、90度は水平基線に相当する。斜め45度はそれらの中間的な値をとる。周波数変化はほぼ同様の形である。これらの特性は、全体として周波数が上下しているが、ほぼ中間位置では周波数が単調に変化する領域があり、変極点付近ではほぼ直線的になる。この領域を取り出すことによって、合成開口レーダで用いられている空間分解能圧縮の手法であるチャープ信号のマッチフィルタリングを行い、空間分解能を生成することができる。

合成開口レーダのアジマス圧縮やチャープパルスのレンジ圧縮とは異なり、十分遠方から到来する平面波の場合には、マイクロ波干渉計の開口合成では位相中心を反対にした、双対の仮想的な干渉計を考えることができる。その仮想的な干渉計は実際の干渉計から得られる複素ビジビリティ関数の複素共役関数になるため、実際に測定しなくても開口合成処理に組み込むことができる。図3(B)では45度の基線オフナディア角について共役なビジビリティ関数を加えている。この周波数変化はもとのビジビリティ関数の符号反転になるので、周波数がゼロからの領域を用いることにより合わせて約2倍の周波数変化を

有するビジビリティ関数が得られ、空間分解能がその分だけ改善される効果がある。しかし、本稿では原理の記述を明確にするためこの処理には触れず、図 2 に示すような基本的な 2 アンテナの干渉計によって得られるビジビリティ関数のみを用いた信号処理過程を次に示す。

2.3 信号処理

超合成の信号圧縮過程を図 4 に示す。基線オフナディア角が 30 度の場合であり、上半分に点ターゲット（点雑音源）とそれに関して得られる干渉計信号やその特性を、下半分には像再生のためのレファレンス関数およびウィンドウ関数と再生像を示す。まず対象の点ターゲットを x 軸の原点に置く。観測されるビジビリティ関数は図 3 (A) 同様に周波数変化のある信号として得られる。この周波数変化と更に周波数変化率を合わせて示している。像再生はもともと波源の位置が未知であるので、理想的な点波源に関する位相を用いて作成したビジビリティ関数をレファレンス関数として使い、マッチフィルタリングを行う。図の示すように、点波源から x だけ離れた位置では再生位置が点波源位置から離れている場合、レファレンス関数とビジビリティ関数が一致せず再生値は小さい。 x が小さくなる波源付近では値が大きくなり、完全に一致する波源位置で最大値となるような点像応答をつくる。完全なニア FM であれば、サイドローブ低減のため以外にウィンドウ関数は不要であるが、線形ではないビジビリティ関数の周波数変化の効果を補正するために、その周波数変化率に比例するウィンドウ関数を用いている。さらに、点像応答のサイドローブを低減するための三角テーパウィンドウも、周波数領域において三角形になるように時間領域での形を補正している。このようなビジビリティ関数の処理により 1 次元の空間分解能がプラットフォームの移動方向に沿って、または、時間軸に沿って生成される。図 4 は 1 個の点波源について示したが、複数個の波源や連続波源についても、点像応答の重ねあわせやコンボリューションとして再生像が得られることになる。

2.4 2 次元超合成ラジオメータの構成例

地球リモートセンシングでは地表面の 2 次元マッピ

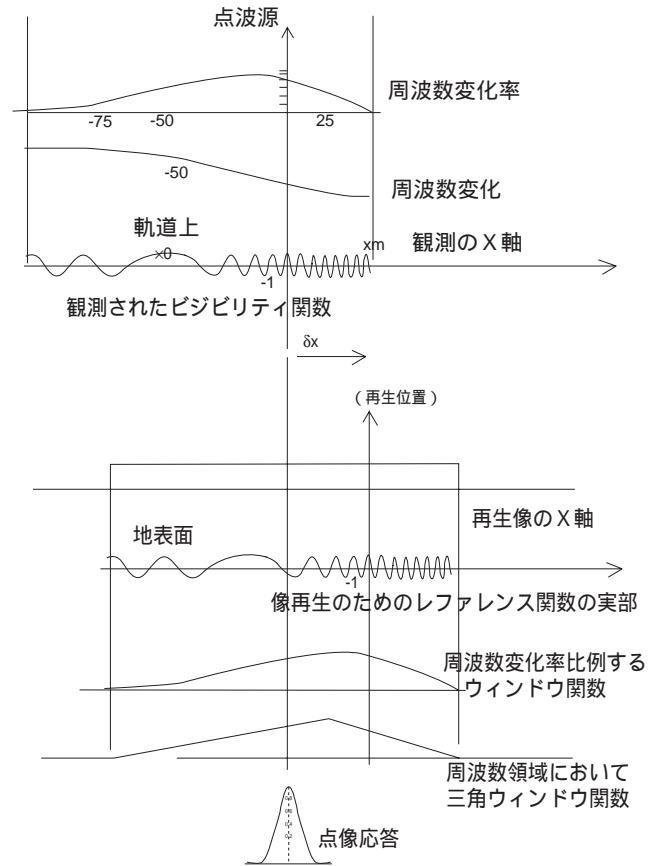


図 4 超合成法の信号処理

ングが必要である。超合成による空間分解能の生成はプラットフォームの進行方向（アロングトラック）にのみ可能であり、直交するクロストラック方向の分解能を実現するための機能が求められる。

従来、人工衛星搭載マイクロ波ラジオメータは装置の単純さのためにアンテナビームのクロストラック走査による 2 次元イメージングを行ってきた。このビーム走査とアロングトラック超合成との組み合わせは、超合成のビジビリティ関数の周波数が低い場合、サンプリング定理に関して可能である。また、ビーム走査法以外にもマルチビームアンテナを用いてクロストラック分解能を生成し、各ビーム毎に超合成を行う方法も可能である。これらの方式は、干渉計の 2 チャンネルの受信系に関して機械式・電気式アンテナビームの走査装置、またはマルチビーム生成装置の必要があり、装置が大規模になる欠点がある。さらに、クロストラック分解能の生成方式としては、マルチ干渉計が候補に挙がる。この方式は図 2 に示すような基本的な干渉計をクロストラックになら

べる方式であり、図5に干渉計基線オフナディア角をパラメータにして3つのアンテナ配置例を示す。上部アンテナアレーはビーム合成用の通常のアンテナアレーではなく、複数の小型アンテナ素子が並んでいるが、それぞれが離れて設置している共通アンテナと組み合わせられ、複数のマイクロ波干渉計を構成している。すなわち、複数の干渉計の片側のアンテナを共通に用いることによりクロストラック方向に展開する干渉計群が得られ、クロストラック方向での空間的なビジビリティ関数を得る。これにより超合成法によってアロングトラックでは時間軸上で、マルチ干渉計によりクロストラックでは、空間配置により合わせて2次元のビジビリティ関数が得られる。2次元のビジビリティ関数を変換することにより、相当する空間分解能の2次元イメージを得る。

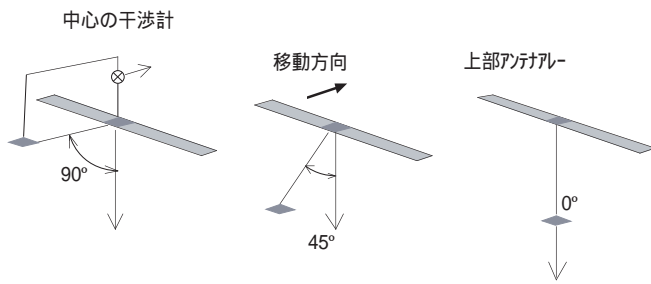


図5 マルチ干渉計による2次元イメージング
超合成ラジオメータのアンテナ配置例

図6はこの方式に基づいて、地表面と相対運動をする低軌道人工衛星に搭載する超合成ラジオメータの概念図である。観測周波数は1.4GHzで、基線オフナディア角をゼロに選ぶことにより軌道上での姿勢安定化を計ることもできる。長いビジビリティ関数を十分に受信するためにはアンテナビームが進行方向に広いことが必要条件である。たとえば30度のビーム角のアンテナの場合には約2波長の大きさであり、1.4GHzでは約40cmになる。ラジオメータのアンテナ部分の長さは約25mであるが0.4mの幅の細長いアンテナとなり、アロングトラック空間分解能はアンテナビームに直接制限されることなくビジビリティ関数の信号処理によって得られ、400kmの観測長から地表面上で必要とされる10km以下の分解能を得ることができる。クロストラック方向ではやはり30度のビーム幅の地表面での広がりが350kmであるので、同時に350kmの幅を観測し、マルチ干渉計によりこの中を分解能である7kmずつに解像する。このように超合成ラジオメータを用いると、干渉計基線長と同程度の大きさをもつ平面状のアンテナのビーム幅にほぼ等しい分解能を細長いアンテナにより実現できる。

このような構成の場合、上部アレーアンテナのうちの1個をレファレンスアンテナに用いると通常の干渉計合成も可能となる。

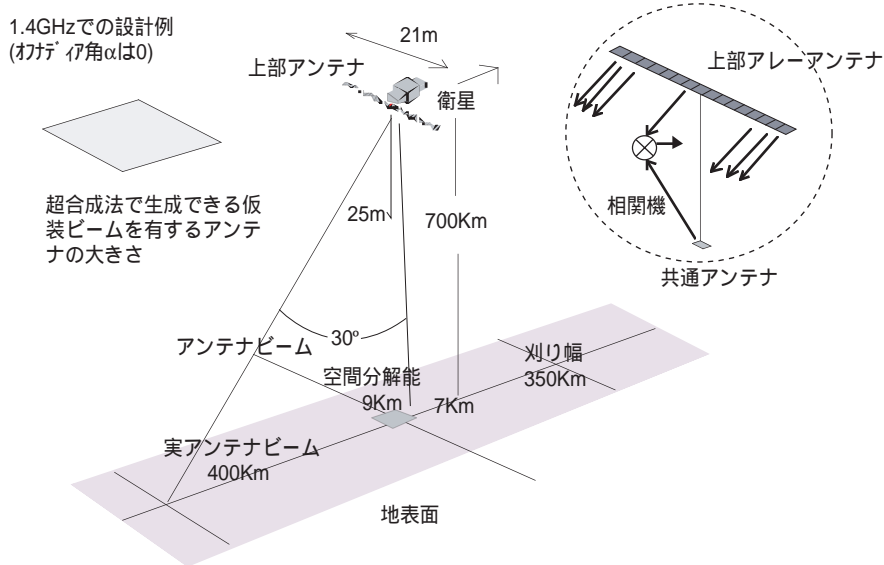


図6 人工衛星搭載の概念図

§3 1次元超合成ラジオメータのフィールド実験

3.1 実験用干渉計

2次元パッシブマイクロ波イメージング実験用のマルチ干渉計超合成ラジオメータ実験装置を開発するための予備実験として、2個のアンテナと1個の複素相関器を組み合わせ、1次元のイメージング実験を行った。図5の右図に示すマルチ干渉計のうち、上部アンテナアレーの真中のアンテナと、下部レファレンスアンテナを組み合わせた1個の干渉計と考えることができ、それだけでは2次元イメージを得ることはできないが、1次元の超合成イメージングを行うことにより、回路設計の検証と感度の確認を行った。干渉計の回路ブロック図を図7に示す。干渉計の2つのチャンネルのフロントエンドで、共通のローカル信号によって6.6GHzで25MHzの帯域の受信信号を1.425GHzに周波数変換する。主受信機ではさらに60MHzまで周波数変換し、アナログ相関器により複素相関を得る。

実験用干渉計の感度位相特性は雑音信号源を使用して測定し、評価した。干渉計の両方の受信チャンネルからアンテナをはずし、ノイズダイオードを用いて回路内で発生させた雑音性信号を2分配して片方にフェイズシフターを挿入し、アッテネータとフェイズシフターにより等価的に入力信号を変化させ、感度と位相応答を測定した。相関器の複素相関出力電圧を複素平面に、位相特性を入力雑音温度を変えてプロットした位相感度特性を図8に示す。400K以上の雑音温度から14Kの低い温度までの入力に対して良好な位相応答をもち、300K以下の常温雑音温度に対

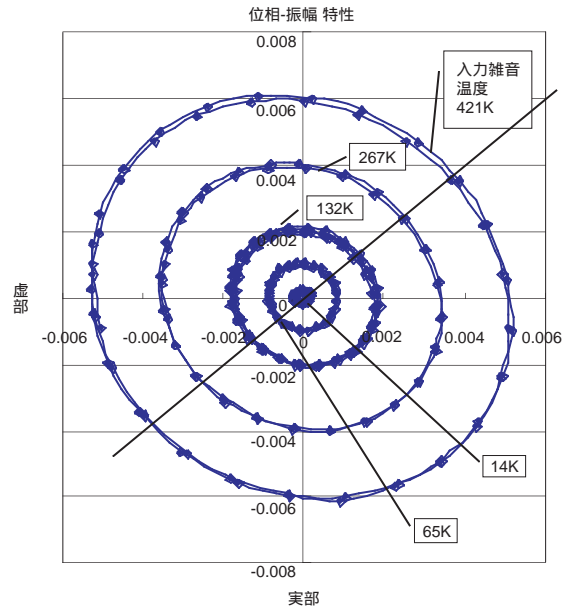


図8 6.6GHz干渉計の位相感度特性

して十分な感度が得られた。

マイクロ波干渉計の受信回路自身から発生する雑音性信号は無相関であるため、理想的な回路ではそれらの信号によって相関器の出力を生じさせることはない。しかし、熱雑音のような微小電力信号を受信するためのマイクロ波干渉計では、干渉計自身の発生するわずかなマイクロ波信号と、その信号のチャンネル間の相互結合がある場合に問題になる。そのような相互結合は相関器出力に強い相関出力を発生させ、干渉計の移動に伴うアンテナ配置の変動があれば、測定対象の微小入力をマスクするような大きな変動を相関器出力に生じさせることになる。

具体的な要因のひとつに、受信フロントエンド付

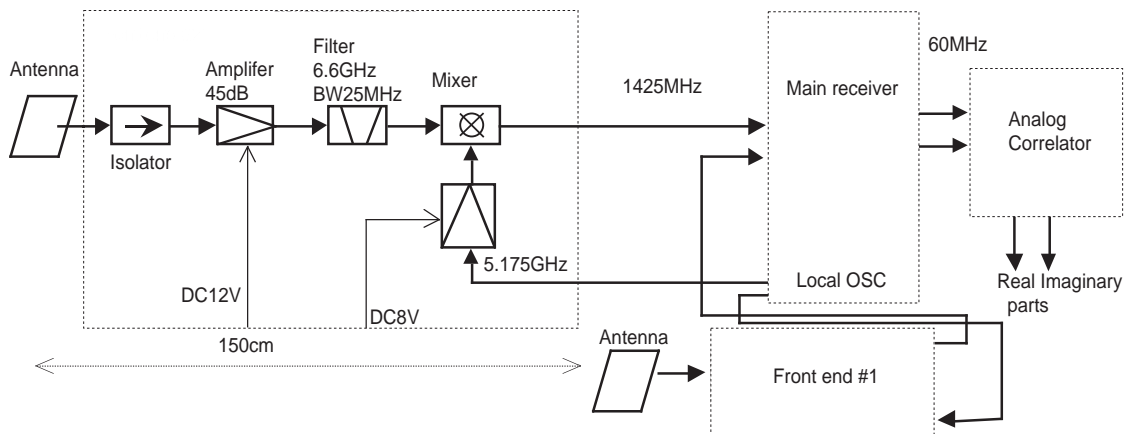


図7 実験用干渉計

近で発生する雑音性信号が挙げられる。マイクロ波干渉計のフロントエンド回路が発生する雑音性信号は、そのチャンネル内を相関器まで伝送されると共に、アンテナから逆放射され、もう一方の受信チャンネルに干渉する要因となる。そこでアンテナからの逆放射を評価するための測定を行った。図7の干渉計の#2フロントエンドのアンテナを外し終端器をつけ、信号が入力しない状態をつくる。#1フロントエンドのアンテナの前に金属反射板を置き、アンテナと反射板との距離を変えて相関器出力を測定する。このように測定することにより、アンテナから逆放射される信号があれば、反射板までの往復の伝播通路長の変化により、回路内の順方向伝播信号との位相差が変化するため、干渉計出力の変化によって評価できる。図9にこの反射板による干渉計の逆放射再入力信号の複素相関信号変化を示す。アンテナからの放射信号の再入力までの伝播距離変化による相関の位相回転が現われている。6mmの距離の往復伝播が約90度に相当し、これに対応する周波数6.25GHzは干渉計の受信周波数6.6GHzにほぼ相当する。これらの現象から、干渉計チャンネル間の相互干渉の原因になりうる信号がアンテナから放射されていることがわかる。逆放射信号の信号源として初段の低雑音アンプが考えられたが、アイソレータの挿入による改善がみられないため、アンテナ本体の抵抗性損失部の熱雑音であるとみられる。

図7の実験用干渉計は、フロントエンドのフィルターケースのシールドの不完全さによる相互干渉があったためイメージング実験にも影響を及ぼしたが、

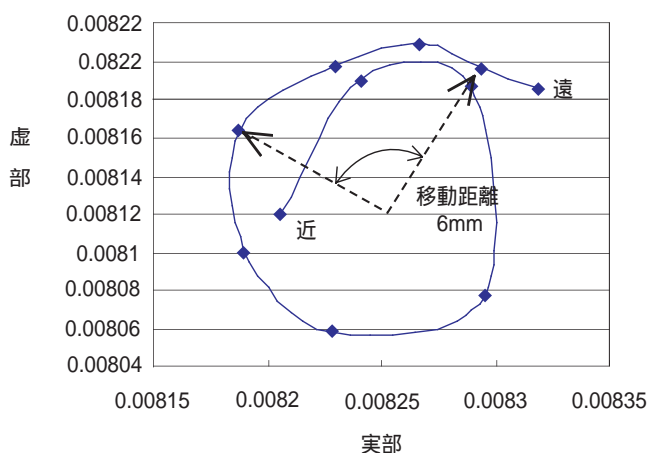


図9 アンテナからの逆放射雑音による相関出力

シールドの補強により改善した。干渉計の両チャンネルにアンテナを接続した際のアンテナ間結合は、#2フロントエンドのアンテナビームが反対方向を向いているため、影響が少ないことを確認した。

3.2 1次元イメージング実験

干渉計に用いたアンテナは、4個のパッチを2×2に配置したアンテナアレーで、ビーム幅は約30度であり、その指向性を干渉計基線に対して15度上向きに設定している。走査方法として操作性を考慮し、プラットフォームの直線的な移動の代わりに図10に示すような干渉計基線の回転を用いた開口合成を採用した。回転走査では、正面のターゲットのビジビリティ関数は、基線の回転によりCosに比例する位相変化を有するが、 α が小さい場合には $1 - \alpha^2/2$ と近似でき、等角速度回転では位相は時間の2次関数、周波数は時間の1次関数になり、(1)式に関して述べたように直線運動のプラットフォームとほぼ等価なビジビリティ関数が得られる。

この干渉計を屋外に設置し、図11のような観測ターゲット配置を対象に、垂直面内で1次元開口合成実験を行った。干渉計基線は1.5m(33波長)であり、この干渉計基線を回転させてビジビリティ関数を測定する。それを開口合成処理することにより像再生を行う。干渉計の特性評価のためにENRが30dBのノイ

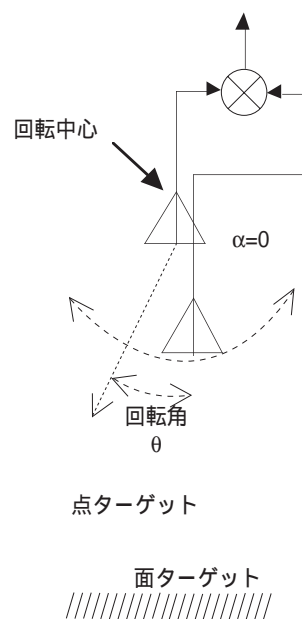


図10 回転走査法

ズダイオードとホーンによる点波源，及びほぼ常温（300K）に近い建物と天空雑音温度（3K）に近い温度分布を観測することにより性能を評価した。

図12に点波源による観測ビジビリティ関数の位相及び周波数変化を示す。それぞれ計算による予測値と回転走査による実測値を示しており，観測角0度を中心に，直線的に変化する周波数変化は図3(B)のオフナディア角0度の場合に相当する。アンテナビームの有効受信範囲は -30° から 0° であるが，重みによる下垂のため実際には -25° から 5° までが有効な受信角度である。このうち， -20° から 0° までの21点のビジビリティ関数を用いて行った点波源に対する再生イ

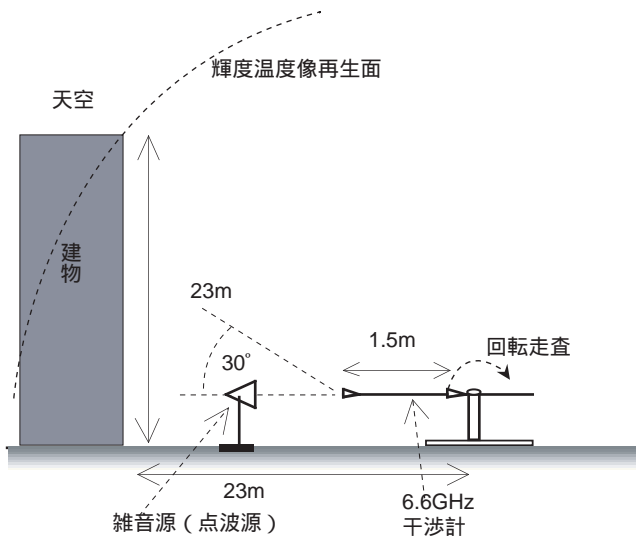


図11 マイクロ波干渉計の回転走査と観測ターゲットの配置

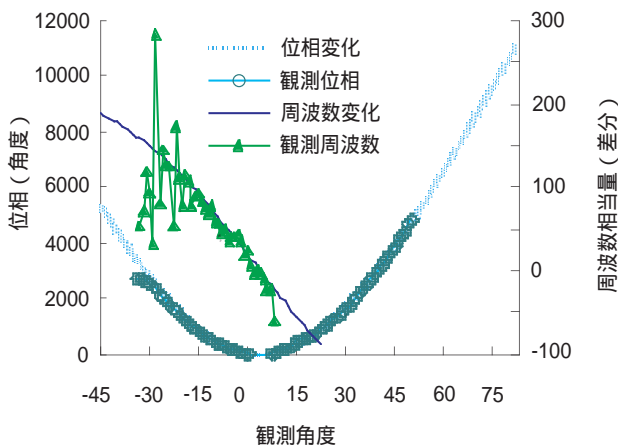


図12 測定された点波源のビジビリティ関数の位相と周波数変化

メージを図13に示す。干渉計基線長に対応する角度分解能の約2度に対して部分的な開口合成のため図では点像の広がりが約4度であるが，ビジビリティ関数の絶対値が示すようなアンテナビームそのものの広がりと比較して，開口合成による鋭いピークが得られていることが分かる。

連続した輝度温度分布の再生像の例を図14に示す。図11の建物配置の垂直面内の輝度温度分布に相当する。同時に測定した赤外温度分布と比較しても，超合成による高空間分解能により急峻な温度変化が得られていることが分かる。

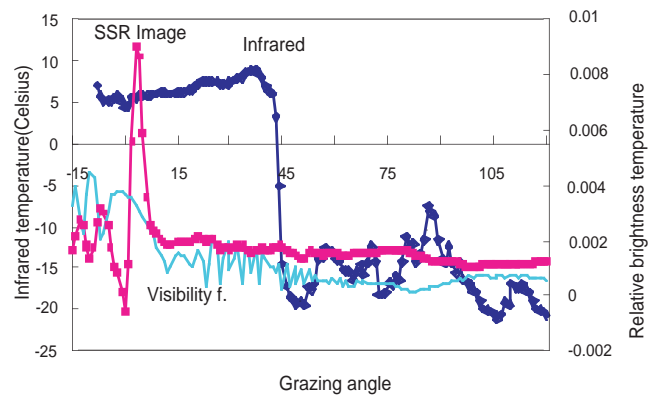


図13 点波源の再生イメージ例

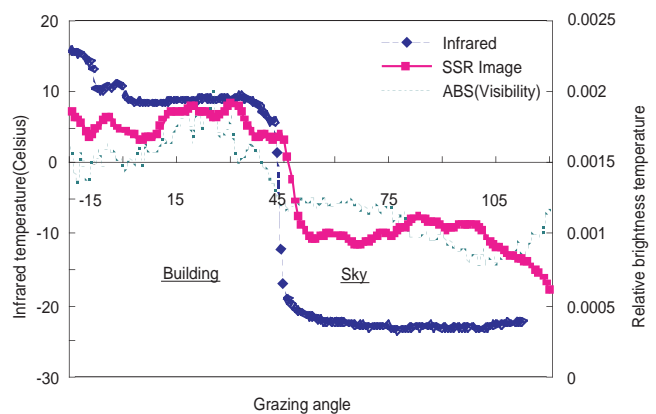


図14 連続体の再生イメージ例（建物と天空）

§4 連続波源に対するイメージング

マイクロ波干渉計を移動させて得られるビジビリティ関数に関して前述の超合成原理では点波源の場合を前述したが，ここでは連続波源の場合について

考察する。アロングトラック超合成を記述しやすいように、図15に示すように上下に2個のアンテナをもつ干渉計を想定する。アンテナは、クロストラックに長い素子としてアンテナビームフットプリントがアロングトラックに細長い形状となる干渉計を想定すると、アロングトラックの位置のみに依存する位相変化を考慮すればよいことになる。

まず、単一の点波源では干渉計の複素出力は次式で表される。

$$f(x) = g(x)e^{jkd(1-\cos(\tan^{-1}[\frac{x}{h}]))} \quad (2)$$

ここに、 $g(x)$ はアンテナの電力指向性であり、伝播距離による減衰も含まれるとする。 d は干渉計の基線長、 k は波数である。 $g(x)$ は後の数値計算に使うためにたとえば次のような関数とする。

$$g(x) = \cos^2 3\theta, \quad -30^\circ < \theta < 30^\circ \quad (3)$$

イメージングフィールド実験を想定し、アンテナ高度を20m、干渉計基線長を170cmとして得られるアンテナパターンを図16に、点波源に関する干渉計出力を図17(a)(b)に示す。前述のように直下付近で周波数がゼロで、離れるにつれて周波数が増えるリニアFM（チャープ）信号になっていることがわかる。地表面のように連続の輝度分布をもつ対象から得られるビジビリティ関数は、輝度分布 $B(x_s)$ と $f(x)$ のコンボリューションとなり、次式のように表される。

$$\gamma(x_s) = \int_{x_a}^{x_b} B(x, -x_s) f(x) dx \quad (4)$$

簡単に動作を評価するため輝度分布を次のようなステップ関数とする。

$$\begin{aligned} B(x, -x_s) &= \Phi(x - x_s) \\ \Phi(x) &= 1, \quad x \geq 0 \\ &= 0, \quad x < 0 \end{aligned} \quad (5)$$

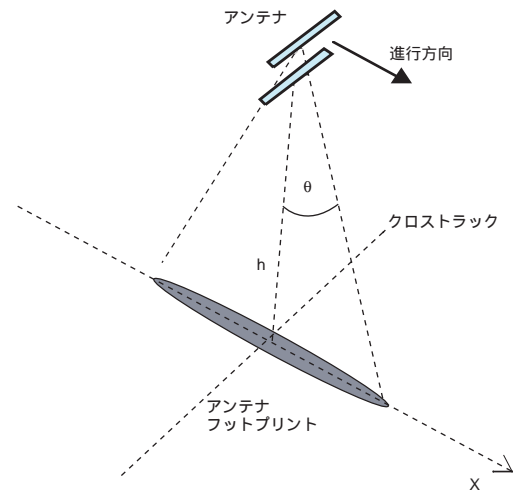


図15 連続輝度分布に対する超合成の評価モデル

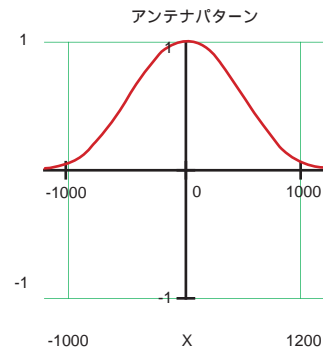


図16 計算に用いたアンテナ電力パターン

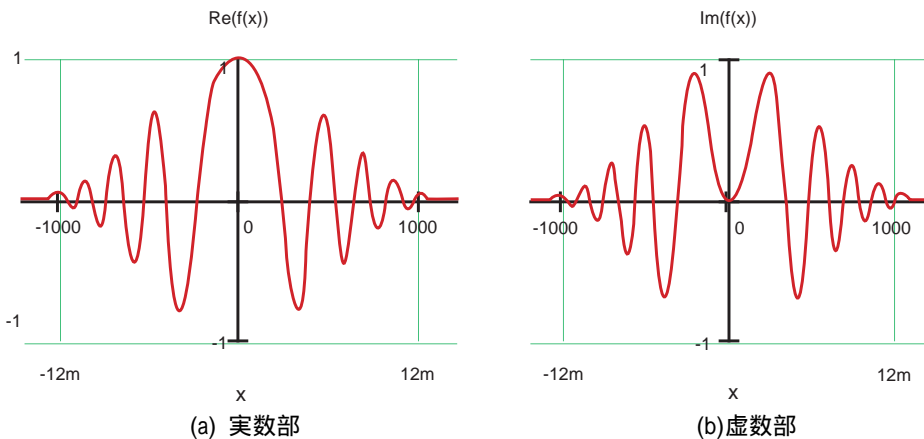


図17 点波源から得られるビジビリティ関数

ステップ関数は $x_s=0$ の場合は図18のように $x=0$ に段差があり、 x_s の変化とともにアンテナに対して x 軸に沿って移動することになる。即ち、 x_s は干渉計の観測対象に対する動きを表している。(5)を(4)に代入して前述のアンテナ高度などのパラメータを用いて、ステップ状の輝度分布の複素ビジビリティ関数が得られる。図19に実数部と虚数部を示す。図17に示される点波源のケースにくらべると、全体の振幅が低下している。これは、実数部虚数部ともに正負に振動する複素相関が連続波源では積分されることにより打ち消し合うことによる。

干渉計を用いずに、図16のアンテナパターンをもつ単一アンテナにより単純に観測される輝度温度分布は図20に示すようにアンテナパターンの広がり程度にぼやけるが、これに比べるとビジビリティ関数の大きさは図21のようにその広がりが約半分になる。これは、干渉計出力は2個のアンテナの積であり、いわゆるマルチプリカティブ（掛け算型）アンテナの効果である。

このビジビリティ関数に超合成を施すと図22に示さ

れるようにステップ状の輝度分布の再生イメージが得られる。超合成によりさらに急峻なステップ状の変化が得られており、高い空間分解能が実現されていることがわかる。このように、図20に示される単一アンテナによる輝度分布イメージと比較すると、干渉計を用いる信号処理により、高い空間分解能が得られるが、点波源のような孤立信号源に対する感度と比べて連続輝度分布に対する感度が低下するた

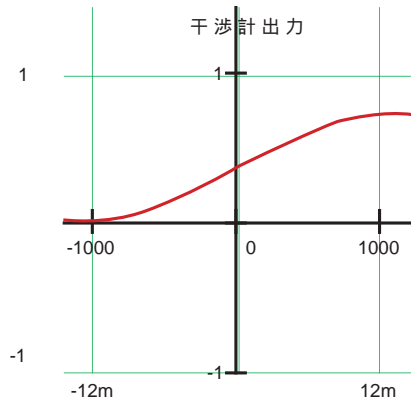


図20 単体アンテナで観測される輝度分布

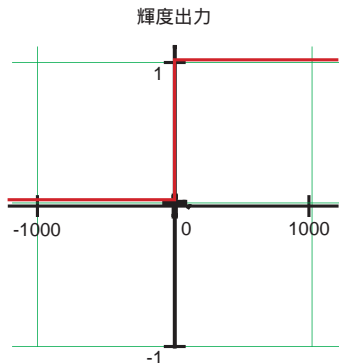


図18 輝度分布の例（ステップ関数）

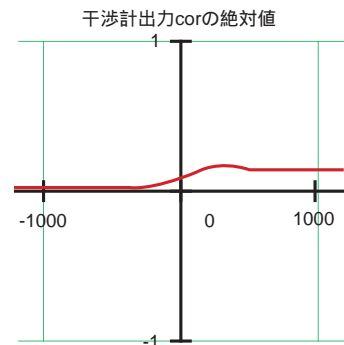
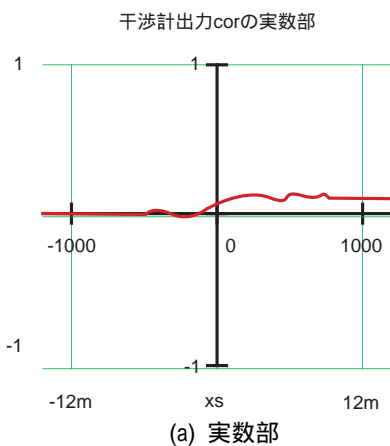
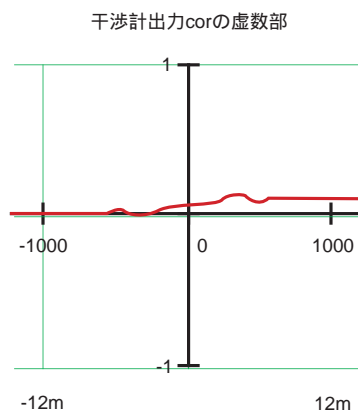


図21 ステップ状の輝度分布のビジビリティ関数の大きさ



(a) 実数部



(b) 虚数部

図19 ステップ状の輝度温度分布から得られるビジビリティ関数

ステップ関数の輝度分布の再生イメージ

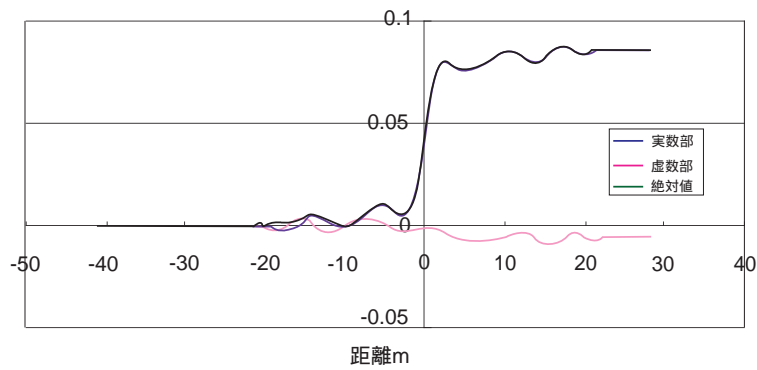


図22 ステップ状の輝度分布の再生イメージの数値評価

め、それらの相対的な評価が必要になり、今後の重要な課題である。

§5 2次元超合成イメージングの実験

イメージング実験は、アンテナ測定用オープンサイトのグラウンドプレーン（鋼板）とその周囲の地面を対象にして、工事用クレーンを用いて行った。図23にそれらの配置を示す。クレーンを用いてラジオメータを上空に吊上げ、回転動作によりプラットフォームの動きを模擬した。高度は約 20mである。ラジオメータの干渉計は 17個をクロストラックに並べ、そのうち 1個をトータルパワーラジオメータとして使用

している。グラウンドプレーンの部分は反射により宇宙空間の低い輝度温度を観測して、地面との比較ができる。実際の観測は右側の地下室付近からグラウンドプレーン上を通り、反対側まで約半回転分である。観測された干渉計データを2次元処理して得られるマイクロ波画像の1例を図24に示す。左側3分の1の均一な低い輝度温度部分であり、グラウンドプレーンに相当する。グラウンドプレーン上に設置したホーンアンテナからのノイズダイオード信号源が、点として得られている。これにより2次元に空間分解能が得られていることがわかる。右側は地面であり、300Kに近い輝度温度をもつ。この観測によりその中間位置付近に強い信号源の存在が判明した。これは

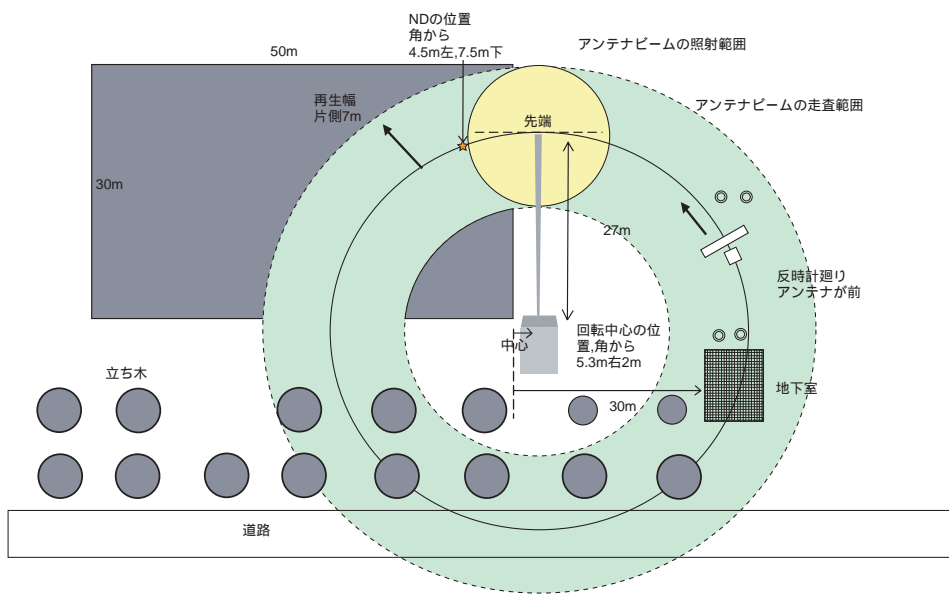


図 23 実験場のグラウンドプレーンと走査面の関係

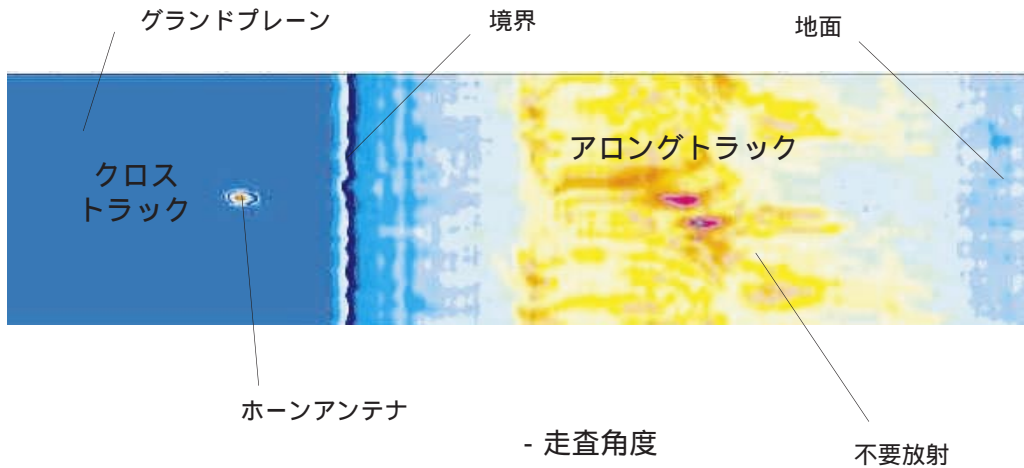


図24 合成マイクロ波画像の1例

地下測定室からグラウンドプレーンまで埋設された電力線や、信号線からの地面を通過した漏洩信号、または保守用ハンドホールから漏洩信号の可能性が考えられる。超合成においては前述のように、これらの孤立波源と背景の連続輝度分布の相対強度に関する感度が異なると予想されるため、図 24 の再生イメージではトータルパワーラジオメータのイメージと重ねたイメージを表示している。超合成信号処理法に加えてこのようなデータの融合処理法も今後の課題である。

§6 おわりに

超合成マイクロ波ラジオメータシステムは簡単な構成のマイクロ波干渉計の利用により合成開口レーダのようなアジマスヒストリを得るので、同様の処理により細かい空間分解能のイメージングを実現できる。本稿では超合成の原理を説明し、そのイメージング性能を1個のマイクロ波干渉計の回転走査による1次元超合成イメージングにより示した。現在、クロストラックに干渉計を並べて2次元イメージを取得できるシステムの実験を実施中であり、そのイメージを一部紹介した。高空間分解能を得るためにアンテナが大きくなりすぎる単一開口アンテナに代わって、超合成などの開口合成マイクロ波ラジオメータが人工衛星に搭載できる方式として期待できる。

さらに、地球規模の観測のみならず電子機器などの雑音発生源などインコヒーレントな雑音放射源の分布測定に対する応用などの可能性もあり、その場合には、観測対象の完全にインコヒーレントな熱雑音とは異なるの雑音信号と、干渉計を用いる方法の適合性の検討が必要になる。

参考文献

- 1) C.S. Ruf, et al., "Interferometric Synthetic Aperture Microwave Radiometry for the Remote Sensing of the Earth," IEEE Trans. GRS-26, No.5, Sep. 1988.
- 2) M. Martin-Neira, et al., "MIRAS, A Two-dimensional aperture Synthesis Radiometer," IGARSS'94.
- 3) K.Komiyama, et al., "Supersynthesis Radiometer for Passive Remote Sensing," IGARSS'92.
- 4) K.Komiyama, et al., "Two-dimensional Supersynthesis Radiometer for Field Experiments," IGARSS'95.
- 5) K. Rohlfs, "Tools of Radio Astronomy," Springer-Verlag, 1986.

(2000.2.16 受付)