

Chapter 21 Antennas and Radiation

これまではこのマニュアルは、Sonnet を使った高周波数回路と伝送線路の解析について焦点をあててきました。しかし Sonnet にとって有益な結果が得られる放射の問題がたくさんあります。この章では、マイクロストリップのパッチアンテナのような 3 次元プレーナ構造の放射の解析や、“Open Waveguide Simulator” の技法を使ってマイクロストリップの不連続部を解析するには、どのように Sonnet を用いたらよいかが述べられています。この技法のもとになっている仮定条件が、詳しく述べられています。モデル化によくある失敗についても触れています。モデル化の技法の正しい使い方の説明に、いくつかの例が盛り込まれています。

またこの章では、任意の 3 次元プレーナ図形の遠方界 (far field) のアンテナパターンを計算する解析および表示用のツールである far field viewer についても説明します。Far field viewer は入力として、プロジェクトファイルの中の電流分布データを使い、パターンをつくります。そのパターンは、直交プロット、極座標プロット、表面プロットで表示することができます。

Background

Em は完全に閉じた、シールドされたボックスの中の 3 次元平面回路の解析ですので、放射構造の解析は通常考えられているものとは少し違います。

しかし、*em* は導波管シミュレータを用いて無限に続くアレーをシミュレートするのに使えます。この技法では、345 ページの図に示されているように、アレーの一部分を導波管内に配置します。導波管の筒は整合負荷をつけた終端に向って垂直で、放射パッチを接続しています。導波管の壁面によって形成される鏡像は、特定の角度に向けて、完全な無限のアレー全体を適切にモデル化しています。

この導波管シミュレータが、私たちが今 Open Waveguide Simulator Technique と呼ぶ、次の節で説明される方法を示すものです。

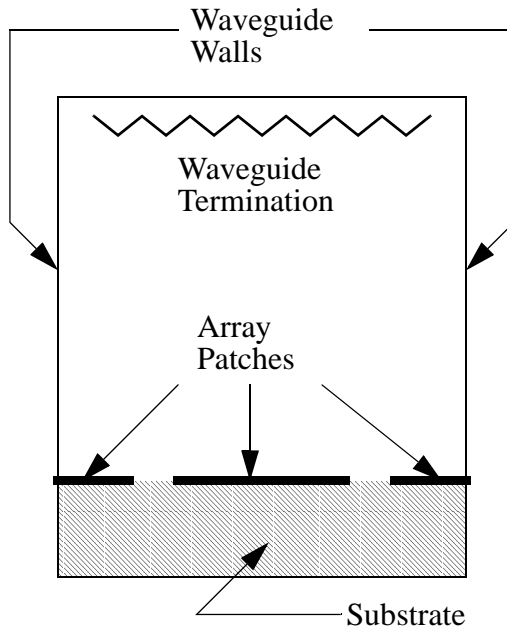
Modeling Infinite Arrays

Em の解析において、シールドされたボックスの壁面は、容易に無限アレーの導波管シミュレータの導波管の壁面を表現しています。側面図を 345 ページの図に示します。

導波管の終端の仕方には少々考慮が必要です。どの導波管のモードでも、*em* で扱う上部の加線の抵抗を導波管モードのインピーダンスに等しくすることによって完全に終端することができます。Project editor では、Box Settings ダイアログボックスの Top Metal ドロップリストから “WGLOAD” を選択すれば、自動的にすべての周波数、すべてのモードでこれを行うことができます。

$$Z_{TE} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad f > f_c$$

$$Z_{TM} = \eta \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \quad f > f_c$$

$$f_c = \frac{v_c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{A}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{B}\right)^2}$$


無限アレイの導波管シミュレータが、ここに述べられている技法を示します。この側面図で、導波管の壁面はマイクロストリップパッチのアレイの鏡像を形成しており、無限に並んだアレイをシミュレートしています。 v_c は媒体が充填されている導波管での光の速度です。

フェイズドアレイにおいて、アレイの1つの特定の方向に向かっては、単一導波管モードが生じます。 Em のソフトでは、上部の加振のインピーダンスを、励振された導波管のモードのインピーダンスにただ合わせるだけで、そのような無限アレイの導波管シミュレータのモデル化ができます。

Modeling an Open Environment

もし無限のアレイをモデル化するのに、閉じた（即ち終端された）導波管を使えるのなら、有限のアレイからの放射をモデル化できます。もっともある条件のもとではありますが。覚えておいて頂きたい重要なことは、深く

解析の準備を行わないと、すぐにこれらの条件は合わなくなり、間違った結果になってしまうということです。下に示すような条件の場合、有用な結果が得られます。

First Condition: 基板の両側面の寸法を 1 もしくは 2 波長より大きくする。

Open Waveguide Simulator を使用すると、シールドされたボックスの壁面は、放射インピーダンスがアンテナから 345 ページに示すような“終端”に向かって垂直に伸びる導波管のように見られます。次に放射は多数の導波管モードの和として近似されます。もし管が小さすぎると、ほとんど伝送モードが現われず、条件 1 を満たさなくなってしまう。

小さい不連続部からの放射のモデル化をする時、容易にミスを起こします。不連続部は、通常波長に比べると小さくなります。不連続部の解析のために、不連続部分から壁面まで、基板 1 ~ 2 枚の厚さ分の間隔をとります。この場合、基板の寸法は条件 1 を満たしそうにありません。もし壁面が導波管のカットオフ以下を形成すると、放射はありません。

Second Condition: 壁面が放射物から十分離れており、影響を受けない事を確認する。

この条件は別の見方をすれば、壁面によってつくられる構造物（不連続部もしくはアンテナ）の鏡像を考えよということです。壁面を構造物との結合がほとんどない鏡像になるように設置します。

不連続部は、ふつう壁面から 2 から 3 波長あれば十分です。シングルパッチアンテナでは、1 から 3 波長あけるのが必要と思われます。特定のものに対しては、これらのガイドラインよりはるかに大きくなります。もし条件 1 が条件 2 より大きな基板の寸法を必要とする場合、大きい寸法の方を使うことが非常に重要です。

Far field viewer をご使用中でしたら、ボックスを大きくするほどよい結果になります。Far field viewer は *em* から算出された S パラメータは完全にオープンな環境から算出されたものと仮定します。もし、ボックスが小さすぎるためにいくらか電力が反射すると、far field viewer によって計算された入力電力は多少間違いがあります。従って far field viewer は 100% 以上のアンテナの

効率を計算してしまいます。もしこうなったら、ボックスサイズは大きくするべきです。

Third Condition: 放射物のフリッジ界（すなわち近傍界）の外側（ $1/2$ 波長が望ましい）に上部の加へを置く。

もしこの条件が破られると、抵抗性（レジスタティブ）な上部の加へは、リアクティブなフリッジ界を含むようになり、この部分は放射器の近傍界を形成します。このリアクティブな入力インピーダンスからレジスタティブな入力インピーダンスへの変化が、間違っただけで放射収量を過大評価してしまいます。

放射器から波長の何千倍も離れたような遠い位置に、上部の加へを置かないでください。ボックスの極端な縦横比は避けるべきです。パッチアンテナの経験的なデータによると、約 $1/2$ 波長離すのがベストです。

Fourth Condition: 上部の加へを Free Space（自由空間）に設定する。

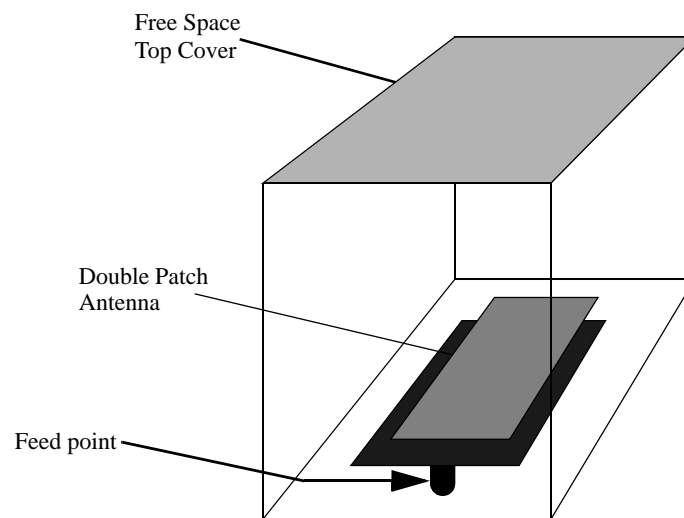
この値は妥協したものです。前の方のページの方程式で示されたように、すべての TE モードは、 $377 \text{ } \Omega$ 以上の特性インピーダンスを持っています。またすべての TM モードは低くなります。このように、 $377 \text{ } \Omega / \text{sq}$ の上部の加へでは、すべてのモードに対して完全には終端できませんが、多くのモードで十分妥協できる終端となります。これは上部の加へを除去した状態に近いものです。ボックスが大きければ、次には後に示すように、放射が近似されます。

Fifth Condition: 放射体は、無視できないほどの表面波を発生させることはできない。

もし要求される精度に比べて、無視できないほどの表面波が生じると、ボックスの側面で反射されます。これが現実の状態でなければ、このようなアンテナはこの技法には不適当です。実際に、条件 5 は条件 2 の特殊な場合です。もし無視できないほどの表面波があると、条件 2 は満足できません。この条件は重要なので条件 2 とは別に明確に述べておきます。

一般には、どの表面波も基板の端に達すると反射し、屈折します。この境界条件は、Sonnet の導体壁面とも、完全な自由空間での解析を仮定した無限大の基板とも異なります。

デュアルパッチアンテナが、下図に概念的に描かれています。

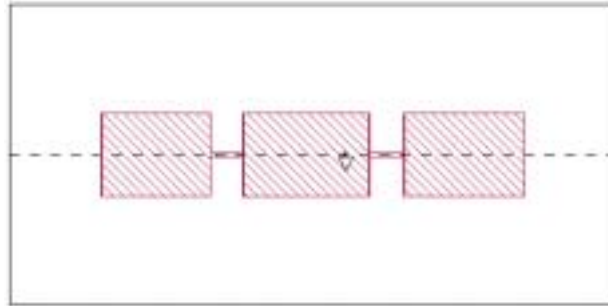


損失のある上部のカバーと、損失のある誘電体層（パッド）を含み、放射器から壁面を離しておくことにより（正しい縮尺比で描いてありませんが）放射のシミュレートができます。上部のカバーを放射器から 1/2 波長離してください。

Project editor で給電点にグラウンドへ向かう via をつくることにより、給電点が、つくられます。それからボックスの壁面で基板の端に典型的なポートを指定するのと同じようにして、その via のグラウンド側をポートとして指定します。これと同じアンテナを示したファイルは、“patch.son” という名前で、Sonnet の例題から入手できます。

Validation Example

検証のために、1993 年パリの HYPER で、EEsof ユーザーズ ミーティング において発表された、フランスの Antennas & Stealthness Dept. Matra Defense の E. Ongareau 氏の研究を、許可を得てお見せします。下図は 3 つのパッチがあるアンテナを上から見た図です。このアンテナは単に実際の有効性を検証するものです。最適な VSWR には設計されていません。



Matra Defense 提供によるトリプルパッチアンテナを上から見た図です。中央のパッチは同軸のプロブ（三角形で示されています）で給電されています。アンテナ全体の周波数帯域を広げるために、それぞれのパッチは異なる周波数で共振します。

単独のマイクロストリップパッチアンテナでも良い結果が得られます。ここでは Open Waveguide Simulator の技法を用いて解析された、より洗練されたアンテナの 1 つとして、この例を引用しています。

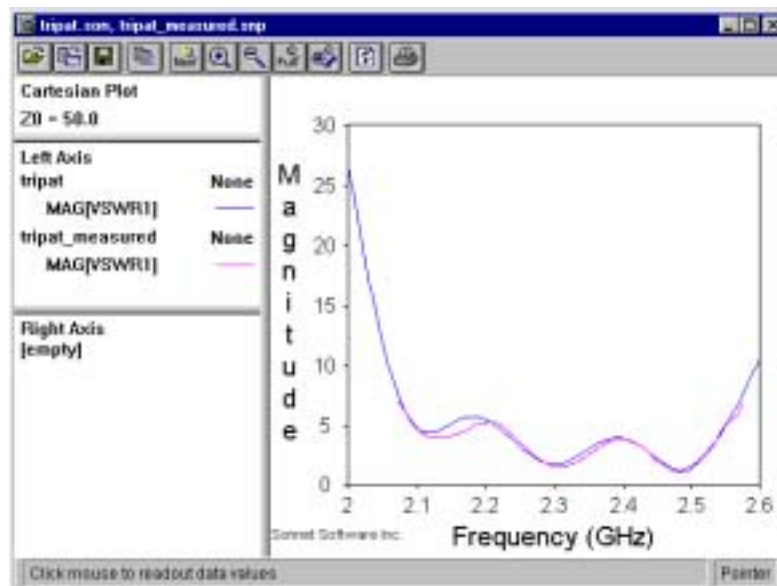
このアンテナでは、それぞれのパッチがお互い少し異なった共振周波数を持っており、その結果周波数帯域が広がります。このアンテナは、中央のパッチに接続された同軸のプロブにより下から給電されています。その給電点は三角形で示されています。

基板の誘電率は 2.94 で厚さは 3.04 mm です。図は基板の寸法 200 mm x 100 mm のものを縮小したものです。上部の加線は基板表面から 200 mm 上にあります。パッチのサイズは 0.78125 mm x 0.78125 mm です。空気と基板の損失正接はともに 0.001 です。この小さな値の空気の損失は伝搬モードを終端するのに役立っています。

Sonnet User's Guide

アンテナプロジェクトファイル [Tripat](#) が Sonnet の 例題から入手できます。Sonnet の例題の入手方法については、いずれかの Sonnet のプログラムメニューから Help ⇒ Examples を選択し、続いて Instructions ボタンをクリックします。

下図に結果が示されています。それぞれのパッチの VSWR の低い点の測定データと計算結果との差は約 1% であることがわかります。これはこの技法を用いたパッチアンテナの解析の典型的なものです。共振周波数（つまり反射 0）の差は、残りのプロットの差を決定します。解析的な誤差、製作上の誤差、そして測定誤差の程度は、このデータからは決められません。



トリパッドパッチアンテナの測定データと計算データは、完全に別々に得たもので、つじつまを合わせるのに“微調節”する機会はありませんでした。

もし上で示された測定結果と計算結果との差が受け入れられる程度のものであれば、ある特定のプロジェクトに与えられた必要条件のもとでは、Open Waveguide Simulator 技法は有用な結果を出せるでしょう。

Far Field Viewer

Far field viewer の目的は、励振といくつかの方向（例えば、phi や theta の範囲）を与えて、アンテナの遠方界 (far field) パターンを計算することです。Far field viewer は、所望の周波数について、*em* で生成されたアンテナの電流密度データを読み込むことから始めます。Far field viewer は、プロジェクトファイルの中の電流分布情報を使い、所望の遠方界のアンテナパターンの情報を生成します。このパターンの情報は、直交プロット、極座標プロット、表面プロットの 3 つのうちの 1 つで見ることができます。方向の値、ポートの励振と終端のデフォルト値が使用されて、far field viewer のスタートアップ時の 1 つめの周波数のプロットを計算します。その後でユーザが周波数、放射パターンの方向、所望のポートの励振と終端を指定します。

Far field viewer は、*em* から生成された電流密度データを使用するので、*em* と同じ種類の回路を解析することができます。これらには、マイクロストリップ、コプレーナ構造、パッチアンテナ、パッチのアル、そして他のミルリヤの回路が含まれます。*em* と同様に、far field viewer はポートや金属タイ、周波数はいくつでも解析できます。Far field viewer は次のものは解析できません。横向きに放射する回路。垂直な成分や同軸の構造。ワイヤアンテナ。表面波アンテナ。フレットの成分による放射のある構造。1 つの層に複数の誘電率が必要な構造。

電流データは、*em* では金属ボックスを含んで計算されますが、far field viewer の計算では、その金属ボックスは取り除かれるということに注意してください。この章の前の方で述べた、これらのエッジリング上の考察は重要ですが、far field viewer のデータの精度は、*em* のシミュレーションの精度に依存します。

Far field viewer はデフォルトで、ファイルがオープンされている時は、プロジェクトファイルに格納されている電流密度データの 1 つめの周波数を、デフォルト設定の角度とポートの励振を使って解析します。

1 つめの周波数以外のアンテナパターンを得るためには、far field viewer のメインメニューから Graph \Rightarrow Calculate を選択します。Calculate ダイアログボックスが表示され、ユーザが計算したいデータのすべてのパラメータを設定することができます。far field viewer は、プロジェクトファイルの中に格納されている電流によって放射さ

れる電磁界を計算します。基板のまわりに無限に拡がりのあるオープンな環境の中で解析が行われます。Calculate ダイアログボックスについての詳細は、far field viewer のオンラインヘルプをご覧ください。

Far field viewer を使ったチュートリアルは、Sonnet Supplemental Tutorials の 145 ページの “A Two-Dimensional Far Field Viewer Tutorial” をご覧ください。

Analysis Limitations

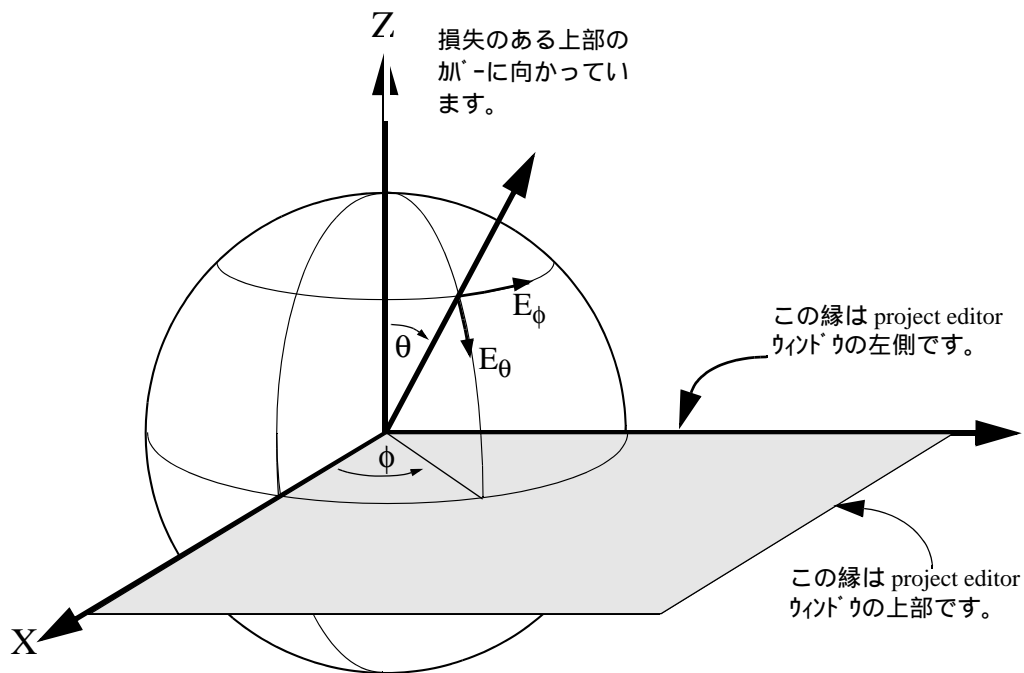
Far field viewer の解析には、以下の制限があります。

- 表示されたアンテナパターンは、ディンパットされたデータを表しません。従って *em* を実行している時にディンパッティングを指定した場合でもポートの不連続部の影響は依然として含まれます。
- 三角形のサブセクション(すなわち斜め線状充填)からの放射は含まれません。
- Far field viewer のパターンは、側面方向に無限に拡がる基板を仮定したものです。

Spherical Coordinate System

アンテナのプロットは、球座標系を用いて表示します。これを以下に説明します。

アンテナのプロットを表示するために、far field viewer は以下に示す球座標系を使います。X、Y、Z の座標は、解析エンジンと project editor で使用されているものです。XY 面は、project editor のウィンドウの平面で、その Z 軸はボックスの上部に向かっています。球座標系は、下図に示すように theta (θ) と phi (ϕ) を使います。



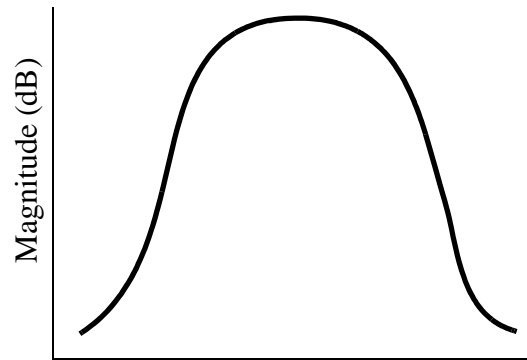
Far field viewer は θ の値に 0 から 180 度が使えます。しかし、90 度を
超える θ の値は、水平線の下になり、無限のグラウンド面のないアンテナに
のみ有効です。上部の半球だけを表示するためには、 θ を 0 から 90 度
までスライドし、 ϕ を -180 から +180 度までスライドします。

上の X と Y 軸は、project editor の X と Y 軸に対応しています。原点は常
に、project editor ウィンドウの左下の隅にあります。

E 面カットまたは、H 面カットを見るためには、 ϕ (ϕ) を 0 または 90 度に設定
し、 θ (θ) を 0 から 90 度までスライドします。放射方位のプロットを表示す
るためには、 θ を設定し、 ϕ をスライドします。

NOTE: ϕ は far field viewer で同じ空間を、 ϕ の定義する各々適切な角度の範囲で、2 回解析することができます。詳細は far field viewer のヘルプの “Graph - Select” をご覧ください。

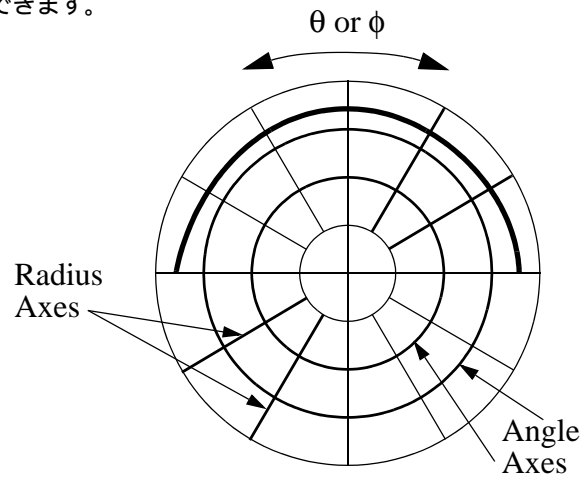
Far field viewer は、直交プロット、極座標プロット、表面プロットの 3 種類のプロットを表示します。これらの 3 種類のプロットを以下に示します。直交プロットは、下図に示すように、X 軸に ϕ が theta (θ)、phi (ϕ)、周波数のいずれかを選択し、直交プロット上に大きさ (dB) を表示することができます。極座標プロットは、角度の軸に theta (θ) または phi (ϕ) を選択することができます。表面プロットは 1 つの周波数の利得に対してプロット表示された theta と phi のすべての計算値を示します。



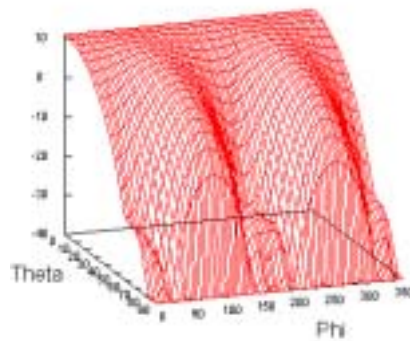
theta (θ), phi (ϕ), or または周波数 ➡

far field viewer は theta (θ),
phi (ϕ), または周波数での
スィープができます。

(a) 直交 (Cartesian) プローット



(b) 極座標 (Polar) プローット



(c) 表面 (Surface) プロット

Normalization

Far field viewer では、3 種類のノーマライゼーション (正規化) を選択できます。far field viewer はデフォルトで、電力利得を表示します。また、指向性利得と絶対値を算出することもできます。この 3 種類のノーマライゼーションを以下に説明します。

電力利得は、アンテナへ供給された全電力が等方的に放射している場合に存在する均一の放射強度によって割り算された放射の強度として定義されます。^[1]

指向性利得は同様に、放射全電力が等方的に放射している均一の放射強度によって割り算された、与えられた方向へのアンテナからの放射強度として定義されます。^[2]

電力利得と指向性利得は等方性アンテナ (すなわち 0 dB)、アンテナの E (電界) の最大値、または任意の値に関して表示することができます。

ノーマライゼーションに Absolute (絶対値) を選ぶと、与えられた角度における放射電力 (ワット / ステラジアン) を表示します。

Far field viewerのメニューからGraph⇒Normalizationを選択して表示されるSelect Normalizationダイアログボックスを使って、far field viewerでのノーマライゼーションを変更することができます。

Polarization

Far field viewer は与えられた方向の電界ベクトルの大きさを表示することができます。353ページの球座標を説明している図で示すように、その大きさはE-theta (E_θ) と E-phi (E_ϕ) の2つの偏波成分のベクトル和として表されます。

Far field viewer で大きさの総和、またはどちらかの成分の大きさを見ることができます。far field viewer では、他の偏波も取り扱えます。これはfar field viewer のヘルプの“Graph - Polarization”で説明されています。

References

- [1] Simon Ramo, John R. Whinnery and Theodore Van Duzer, Fields and Waves in Communication Electronics, John Wiley & Sons, Inc. 1994, pg. 601.
- [2] Ibid, pg. 600.