

PRECISE MEASUREMENT OF THE INSTALLED CABLE ATTENUATION

Kenta Futatsukawa*^{A)}, Shozo Anami^{A)}, Kobayashi Tetsuya^{A)}, Zhigao Fang^{A)},
Yuji Fukui^{A)}, Michizono Shinichiro^{A)}, Fumiaki Sato^{B)}, Shinichi Shinozaki^{B)},

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

Abstract

In almost all accelerator facilities, many radio-frequency (RF) cables are used as the RF transmission system, the cavity field and the beam monitors, and so on. It is required to measure the frequency characteristics of these cables before the beam operation. Generally the cable attenuation is extracted from the transmission coefficient S_{21} to use a network analyzer. However, this approach cannot be practically adopted for the installed cables because they are almost cut adjusting the length and attaching a connector under the installation. Therefore, a unique technique using short and open connectors, which distinguishes the reflection wave in the end connector from that in the way of the cable, is introduced. This investigation shows that this measuring technique is not only the high precise result but also convenient.

敷設ケーブルの高周波電力損失の高精度測定

1. はじめに

ほぼ全ての加速器施設で、低電力高周波の伝送ラインのほか、加速空洞内の電界や大電力高周波の伝送系、ビームのモニタ用としても高周波ケーブルが使用されている。これらの敷設された高周波ケーブルにおいては、運転前にその高周波特性を把握しておくことが必要不可欠である。一般的には、ケーブル内での高周波電力損失は、ネットワークアナライザを使用して透過電力係数 S_{21} を測定する方法で求められる ($-20 \log_{10} |S_{21}|$ dB)。しかし、実際には以下の観点から加速器の敷設ケーブルに対してこの手法を使用することは容易ではない。

- 放射線防護の観点から、加速器トンネルとその制御システムは離れた場所に設置されることが多く、モニタ用のケーブルはこの間を通るように敷設される。この場合は、透過電力を測定するには、敷設ケーブルと同経路を通る校正されたケーブルが必要になる。
- ケーブルは敷設後に現場で長さを揃えて、端末処理されることが多く、このような場合は事前に透過電力を測定することはできない。
- ケーブルは同じ長さでも、その形状によって電力損失が異なる (例えば、束ねられた状態と伸ばした状態)。よって、高精度の測定結果を得るためには、敷設後にケーブルの形状を変えずに測定する必要がある。また、これは校正ケーブルに対しても同様のことが言え、苦勞して校正されたケーブルを加速器トンネルと制御システムの間に設置しても、この校正ケーブルの高周波特性が校正時と設置後で異なっているということは十分に考えられる。

従って、このような敷設ケーブル内での高周波電力損失は、信号発生器 (SG) とパワーメータを用いて行う方法を採用する場合が多い。

*kenta.futatsukawa@kek.jp

J-PARC リニアックでは、2012年に新規に共振周波数 972 MHz の ACS 空洞 25 式を導入し、後段のシンクロトンへの入射エネルギーの増強を計画している^[1]。それに伴って、ACS 空洞用の高周波ケーブルを大量に敷設し、そのケーブル内での高周波電力損失を測定する必要がある。そこで、既存の方法より容易でかつ高精度の測定方法を模索している。今回、敷設ケーブル内での高周波電力損失の測定方法として、ケーブル末端での反射を利用する手法を検証した。

2. 試験ケーブル

2.1 試験ケーブルの高周波特性

本検証において、試験用の高周波ケーブルとして 25 m の ANDREW LDF2-50 を採用し、束ねた状態で、そのケーブル内での高周波電力損失の測定を行った。以下、本稿内ではこのケーブルを試験ケーブルと呼称する。試験ケーブル内での高周波電力損失をネットワークアナライザの透過電力係数から求めると、周波数 324 MHz で -1.607 ± 0.003 (σ) dB、972 MHz で -2.851 ± 0.004 (σ) dB となった¹。図 1 は周波数 3 MHz から 3 GHz まで範囲での試験ケーブル内での透過電力損失を表している。

本稿内の検証は、異なる装置・センサ・ポートを使用、又はケーブル・センサの再校正するなど毎回条件を変更して 50 回以上の試行を行っている。本稿中の数値データはそれらの平均であり、測定誤差として標準偏差 (σ) も計算している。実際の敷設ケーブルにおいては、複数回の測定を行い平均値を求めるという手順を経ることは通常ない。そのため、透過電力損失の直接測定との平均値の差が小さいことと共に、この標準偏差が小さいこと (測定結果の再現性が良いこと) も重要となる。

¹ネットワークアナライザとして Agilent Technologies の E5071C、電子校正モジュールとして同社の N4431-60007 を使用して測定を行った。



図 1: 試験ケーブル内での高周波電力損失。ネットワークアナライザの透過電力から求めた。

2.2 信号発生器とパワーメータによる測定結果

上記で説明したが、敷設ケーブル内での高周波電力損失を測定する場合は、SG とパワーメータで測定する手法が採用されることが少なくない。試験ケーブルでも、片端に SG (Hewlett Packard 8647A) で 0 dBm の連続波を入力し²、他端にパワーメータ (Giga-tronics 8542C) を接続し、電力損失を直接測定した。その結果を下記に述べる反射波の位相を回転させる方法と比較するために示す。尚、パワーメータのセンサには、Giga-tronics 80350A を使用した³。この方法を用いて試験ケーブル内での高周波電力損失を求めると、周波数 324 MHz で -1.604 ± 0.025 (σ) dB、972 MHz で -2.869 ± 0.012 (σ) dB となった。

この方法の利点は、下記に述べる方法と比べてフィッティングや複雑な計算を必要とせず、電力損失を求めることができることである。一方で、本検証結果が示すように、ネットワークアナライザによる透過電力損失測定と比較して、測定誤差が 3 倍大きな値になるなど測定精度が一番の問題になる。

3. トロンボーンによる位相回転の実演

ここでは、位相を回転させるために、トロンボーンを使用した独創的な方法と結果を紹介する^[2]。図 2 に、この手法によるケーブル内での高周波電力損失測定のセットアップを示す。ケーブルの片端にトロンボーン、他端のネットワークアナライザを接続する。トロンボーンの長さを変えることにより反射波の位相を回転させ、ネットワークアナライザで反射係数 (S_{11}) の実成分と虚成分を測定する。各測定点の円フィットで得られた半径からケーブル内での高周波電力損失の情報を引き出す。

本システムでは、PLC (Programable Logic Controller) システムとパソコンを使用して自動制御でトロンボーンの長さの変更とデータの収集を行うことができる。実際の測定では、ネットワークアナライザとして Agilent Technologies の E8357A、電子校正モジュールとして同社の 85092-60009 を使用した。トロンボーンの長さ変更は、反射波の位相が約 20° 回転するように設定した。

この方法では、試験ケーブル内での電力損失を引き

²入力パワーを大きくすると信号と雑音の比が改善し、より高精度測定を行える可能性があるが、測定器の破壊などの可能性が少なく実用的な 0 dBm の連続波の条件を採用した。

³4 台のパワーメータ (8542C) と 4 つのセンサ (80350A) の組み合わせを変更しながら測定を行った。

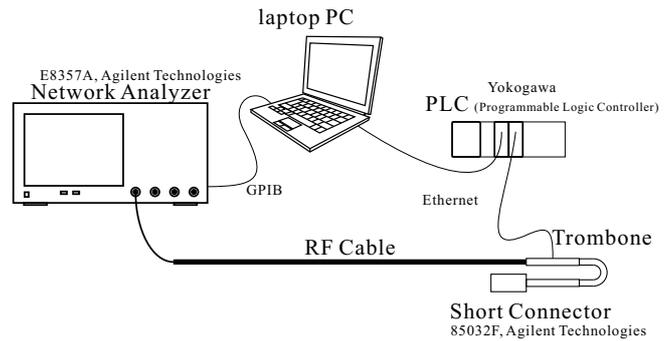


図 2: トロンボーンを使用して位相を回転させたときのセットアップ。試験ケーブルの片端にトロンボーンを接続し、他端のネットワークアナライザで反射係数 S_{11} を測定する。ノートパソコンを用いて PLC を通じて自動でトロンボーンの長さを変更して位相を回転し、ネットワークアナライザでデータを自動取得する。

出すためにはトロンボーンでの電力損失の寄与を測定データから引く必要がある。そのために、ネットワークアナライザにトロンボーンを直結させたデータも収集した (図 2 の試験ケーブルを省いたセットアップ)。以下、図 2 のセットアップを試験ケーブルとトロンボーン系、ネットワークアナライザにトロンボーンを直結させたときをトロンボーン単体と呼称する。そのとき、トロンボーンの寄与の校正方法は 2 通りの方法を試した。

校正方法 1

試験ケーブルとトロンボーン系の結果とトロンボーン単体の結果について独立に円フィッティングを行い、各電力損失を求める。そのあと、トロンボーン単体の電力損失の減法により、試験ケーブル内での電力損失を引き出す。これを式で表現すると、

$$\frac{-|20 \log_{10} R^{cable+trom}| + |20 \log_{10} R^{trom}|}{2} \text{ [dB]},$$

となる。ここで、 $R^{cable+trom}$ と R^{trom} はそれぞれ試験ケーブルとトロンボーン系の結果とトロンボーン単体の結果を円フィットで得られた半径である。全体を 2 で除算しているのは、測定された反射波は試験ケーブルを往復しているためである。周波数 972 MHz の高周波における試験ケーブルとトロンボーン系での測定点 (黒丸) を円フィットして、 $R^{cable+trom}$ を求めた結果を図 3 (a) に示す。周波数 972 MHz の試験ケーブル内での電力損失の測定結果は、この校正方法を使用すると -2.865 ± 0.016 (σ) dB となった。

校正方法 2

同長さのときのトロンボーン単体の測定データを使用して、試験ケーブルとトロンボーン系の各測定データからトロンボーンの寄与を校正する。そのあと、校正点に対して円でフィッティングを行い、試験ケーブル内での電力損失を求める。トロンボーンの寄与を校正された点 ($S_{11}^{cable,(i)}$) は、

$$S_{11}^{cable,(i)} = \frac{S_{11}^{cable+trom,(i)}}{|S_{11}^{trom,(i)}|},$$

と表すことができる。ここで、 $S_{11}^{cable+trom,(i)}$ は試験ケーブルとトロンボーン系の各測定点、 $S_{11}^{trom,(i)}$ はトロンボーン単体の各測定点を表している。図 3 (b) に $S_{11}^{cable+trom,(i)}$ を黒丸、 $S_{11}^{cable,(i)}$ を赤四角で示している。校正点の円フィットで得られた半径を R^{cable} とすると試験ケーブル内での電力損失は

$$\frac{-|20 \log_{10} R^{cable}|}{2} \text{ [dB]},$$

と表すことができる。周波数 972 MHz の試験ケーブル内での電力損失の測定結果は、この校正方法を使用すると $-2.865 \pm 0.016(\sigma)$ dB となった。

今回の検証では、トロンボーンの寄与の校正方法による試験ケーブル内での電力損失の測定結果に違いは表われなかった。測定の利便性を考えると、図 2 のネットワークアナライザとトロンボーンを配置を交換することが望ましいが⁴、この配置ではトロンボーンは $VSWR$ の寄与が大きくなり、今回は芳しい結果を得られなかった。

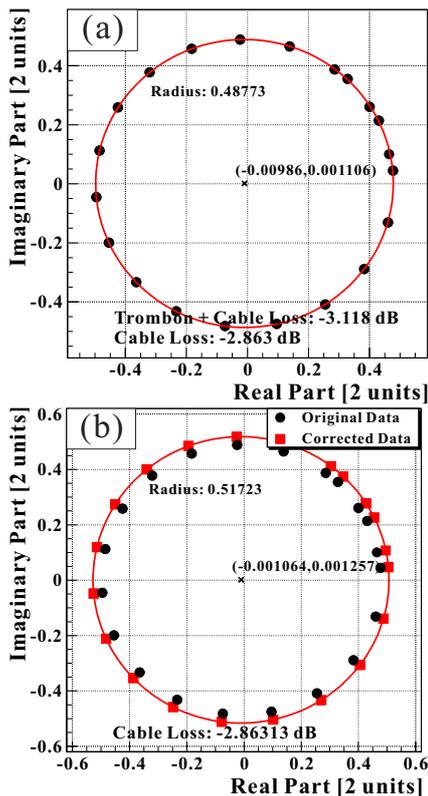


図 3: トロンボーンによる位相回転による試験ケーブルの電力損失測定の円フィット結果。(a) は校正手法 1 の試験ケーブルとトロンボーン系の測定点を円フィットした結果を示している。(b) の黒丸は試験ケーブルとトロンボーン系の測定点、赤四角は校正手法 2 で校正された点を示している。

⁴例えば、電力を使用するのは地上部だけで、加速器トンネル内ではコネクタを用意するだけで良い。ネットワークケーブルなどの敷設も必要がない。

4. コネクタを使用した位相回転

4.1 測定原理

上記の位相を回転させる方法としてトロンボーンを使用する方法では、

1. 一回の試行で測定点が多く、測定時間が長い。
2. ネットワークアナライザと自動制御のトロンボーンと、ケーブルの両端の場所で電力が必要になる。
3. トロンボーン制御のための通信ケーブルも準備する必要がある。

など、大量の敷設ケーブルを測定するとなると利便性が悪い。そこで、より容易な方法として、ショート/オープンコネクタを使用して固定端反射と自由端反射の違いを利用することを試した。図 4 に、RF コネクタを使用する方法による試験ケーブル内での高周波電力損失を測定したときのセットアップを示す。単純に高周波ケーブルの電力損失を反射波を利用して測定するとケーブル内での $VSWR$ により測定精度が悪い⁵。これを高次の項を無視して模式的に示したのが、図 4 (A)~(C) である。実際にネットワークアナライザで測定される反射波は、ケーブル末端での反射 (A) だけでなく、ケーブル途中での反射 (B) や (C) との合成波である。

図 4 (A)~(C) の寄与が RF コネクタの種類の違いによってどのように変化するかを以下に示す。

- (A) ショートコネクタによる固定端反射の場合は、位相が π 反転する。一方で、オープンコネクタによる自由端反射の場合は、位相はそのまま反射される。つまり、ショートとオープンでの反射波を比較すると位相が反転している。
- (B) コネクタまで届かずにケーブル途中で反射されているため、この寄与の位相はコネクタの種類に依存しない。
- (C) この寄与は、コネクタで 2 回反射している。ショートコネクタの場合は、位相が 2 回反転し、結果として最初の位相に戻ることになる。オープンコネクタの場合は、位相はそのまま反射される。よって、この寄与の位相もコネクタの種類に依存しない。

従って、ショートコネクタを使用時の反射係数とオープンコネクタを使用時の反射係数の差分をとることにより、ケーブル末端での反射波成分 (A) だけを抽出することができる。ケーブル内での電力損失は、次のように表すことができる。

$$\frac{-|20 \log_{10} |S_{11}^{short} - S_{11}^{open}|/2|}{2} \text{ [dB]}.$$

ここで、 S_{11}^{short} はショートコネクタを使用したときの反射係数、 S_{11}^{open} はオープンコネクタを使用したときの反射係数である⁶。

⁵本試行ケーブルでは、972 MHz の高周波における透過電力損失が $-2.851 \pm 0.004(\sigma)$ dB であるのに対して、単純に反射を利用した場合はショートコネクタのとき $-2.899 \pm 0.037(\sigma)$ dB、オープンコネクタのとき $-2.784 \pm 0.033(\sigma)$ dB という結果が得られた。

⁶ここで、反射係数 S_{11} は実成分と虚成分を持っていることを注意したい。各コネクタにおける電力損失の差分ではなく、反射係数の差分を取る必要がある。

本試行において、ネットワークアナライザは Agilent Technologies の E5071C、電子校正モジュールは同社の N4431-60007 を使用した。また、使用したコネクタは、同社のオープン (85032-60014) とショート (85032-60015) である⁷。

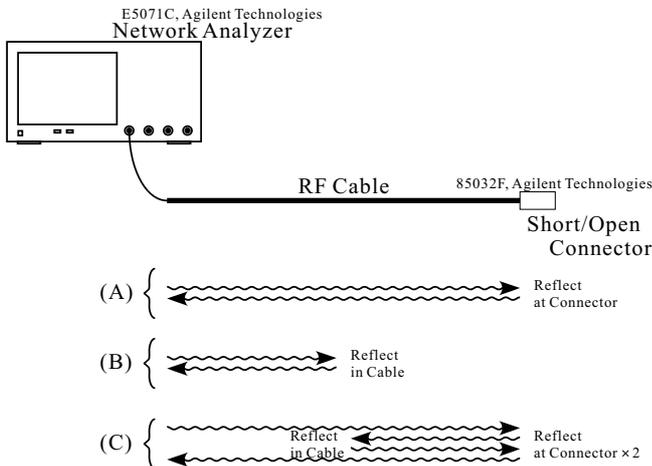


図 4: ショート/オープンコネクタを使用して、固定端反射と自由端反射の違いを利用することを試した。

4.2 測定結果

図 5 に 3 MHz から 3 GHz までの周波数領域における試験ケーブル内での電力損失測定の結果を示す。図 5 (a) は本測定方法の結果とネットワークアナライザで透過電力損失を測定した結果の差分を表している。本測定方法による測定結果は、周波数 2.5 GHz から高い周波数になると測定結果の差が大きくなり始めるが、それでもこの周波数範囲では、誤差 <1% で測定できていることが分かる。図 5 (b) は各測定方法で試験ケーブルの電力損失を求めたときの標準偏差 σ を示している。本測定方法の標準偏差は、周波数が高いほど大きな値を示す傾向にあるが、周波数 2 GHz でもその値は他の測定方法より小さい。

この方法で試験ケーブル内での高周波電力損失を求めると、周波数 324 MHz で $-1.604 \pm 0.002(\sigma)$ dB、972 MHz で $-2.845 \pm 0.002(\sigma)$ dB となった。表 1 に、各方法における試験ケーブル内での電力損失の測定結果をまとめる。

この方法は、パワーメータを使用する方法やトロンボーンにより位相を回転させる方法と比較して、標準偏差を小さく抑制することができる。他にも利点として、敷設ケーブル測定のために、校正されたケーブルやネットワークケーブルを加速器トンネルからその制御システムまで用意する必要もなく、測定プログラムも必要なく、AC 電源もケーブルの片端だけで済む、測定時間が短いなど容易に測定を行うことができる。また、RF コネクタとネットワークアナライザという高周波加速器施設では所有しているであろう機材しか使用していない。

⁷測定原理からも分かるように、ショートとオープンで位相が反転することが重要である。今回の検証では、ネットワークアナライザの校正キット 85032F 中のコネクタを使用している。

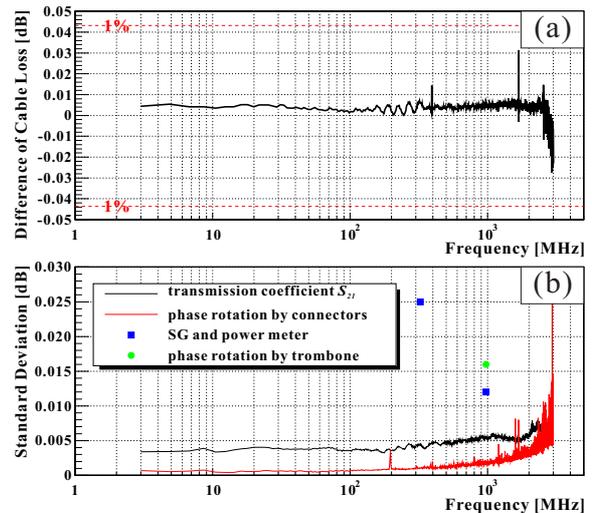


図 5: 試験ケーブル内での電力損失測定結果の比較。(a) は RF コネクタを使用して反射波から求めた方法の結果とネットワークアナライザで透過電力損失を測定した結果の差分を示す。円フィットした結果を示している。(b) の各方法で求めた電力損失の測定結果の標準偏差を示す。

表 1: 試験ケーブル内での電力損失の測定結果

測定方法	電力損失 (972MHz)
透過電力損失 S_{21}	-2.851 ± 0.004 dB
SG とパワーメータ	-2.869 ± 0.012 dB
トロンボーンによる位相回転	-2.865 ± 0.016 dB
コネクタによる位相回転	-2.845 ± 0.002 dB

5. まとめ

ほぼ全ての加速器施設で多数の高周波ケーブルが敷設され、使用されている。それらの敷設された高周波ケーブル内での電力損失について RF コネクタを使用して反射波で測定する方法を提唱し、検証を行った。この方法は、コネクタの性質を利用して、ケーブルの末端での反射波の位相を回転させることにより、ケーブル途中での反射と末端での反射を区別している。また、他の方法と比較しても容易でありながら、本検証の中でも最も高精度な測定結果を示した。更に、高周波の電力損失という基礎情報の測定であると共に、加速器で使用する一般的な機器・道具しか使用していないため、応用範囲が広いと思われる。J-PARC リニアックに新しく敷設する ACS 用高周波ケーブルの測定でもこの方法を採用する予定である。

参考文献

- [1] <http://www.j-parc.jp>; Y. Yamazaki for J-PARC accelerator design team, "Technical design report of J-PARC", KEK Report 2003-13 and JAERI-Tech 2003-44
- [2] H. Katagiri et al., "Low Level RF System for S1 Global in STF", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, p.616-619, Tsukuba, Aug.1-8, 2012