

KEKB 入射器陽電子源における広帯域ビームモニターの特異解析 CHARACTERISTIC ANALYSIS OF WIDEBAND BEAM MONITOR AT THE POSITRON SOURCE OF THE KEKB INJECTOR LINAC

諏訪田剛*

Tsuyoshi Suwada*

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
SOKENDAI (Department of Accelerator Science, The Graduate University for Advanced Studies),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

Abstract

The signal transmission characteristics of a wideband beam monitor (WBM) with feedthrough electrodes are discussed in the frequency region up to 13.5 GHz on the basis of a coupled-mode analysis using an equivalent circuit model with electromagnetically coupled transmission lines. It is demonstrated that in the signal transmission characteristics based on an electromagnetic induction method, electromagnetic couplings for fundamental and higher-order *rf* waves play an important role depending on the spatial configuration and geometrical structure of the electrodes mounted on the WBM with a cylindrical structure. The physical prospect in the calibration procedure of feedthrough electrodes is improved in terms of the signal transmission characteristics over the frequency region. In this report, the modal analyses and experimental investigations of the signal transmission characteristics in the WBM are described in detail. A new method of gain calibration for each electrode is also proposed.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器 (以下入射器) では、SuperKEKB リングへの陽電子入射増強を目指し、2020年夏期保守に陽電子 (e^+) 捕獲部の改造を行なった。本改造では、 e^+ 集束用フラックスコンセントレータ (FC) の放電対策が実施され、 e^+ 捕獲部の4箇所に軌道補正用偏向電磁石と広帯域モニター (WBM) が新たに設置された。WBM の設置により、これまでシミュレーション上でのみ再現されていた e^+e^- バンチの捕獲過程が直接観測できるようになった。WBM のビーム応答に対する詳細解析、実験結果については既に他 [1-3] で報告しているのでそちらを参照してもらいたい。

従来の陽電子収量の最適化では、 e^+ 捕獲部出射後の最初のビーム位置モニター (BPM) で陽電子電荷が計測され、その値が最大になるように幾つかのパラメータが設定される。本モニターを利用すれば e^+e^- バンチの捕獲過程を直接観測できるので、多数のパラメータで構成されるビーム力学上の多次元空間での陽電子収量の最適化に大きく貢献することが期待できる。

本モニターの主目的は、 e^+e^- バンチを時間領域で分離検出することにある。この他にも、 e^+e^- のバンチ長、電荷量、位置計測が時間領域の分離検出により計測が可能となる。このことが計測目的を限定することの無いモニター名称とした理由である。時間領域の計測では、電極や信号伝送路のみならず計測器全体の周波数帯域と周波数損失の低減に注意を払う必要がある。これらは信号波形の歪みや信号強度の低減 (又は S/N) を招くことになるからである。ボタンやストリップラインなど従来電極を利用すると内在する静電容量により広帯域化が困難である。そこで、SMA フィードスルーを突き刺しただけの単純な構造を採用して広帯域化を図った。

SMA フィードスルーとビームとの電磁結合による周波数応答は計算によりその評価は可能である。他方、フィードスルーは真空保持のために絶縁体としてセラミックを使用している。この端子の高周波損失をどのようにすれば補正 (又は校正) できるのかが大きな課題である。同軸ケーブルのようなコネクタ接続が可能な *rf* 部品はネットワークアナライザ (VNA) を用いれば困難なくその周波数特性を計測することができるが、フィードスルー型端子の材料に起因する損失要因の評価は簡単ではない。本モニターの設計では、このような困難も丁寧克服する必要があった。本報告は、フィードスルー型端子材料の周波数特性を評価するための新しい校正手法を紹介するものである。

2. 広帯域ビームモニター

信号伝送特性計測用の WBM を製作した。本モニターは試験用ではあるが、モニター胴体の軸方向長さが違うだけで電極部の構造は全く同じである。Figure 1 に特性評価用モニターを示す。

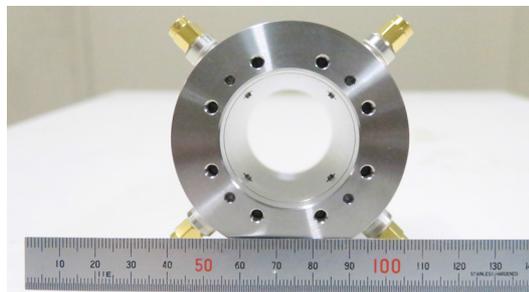


Figure 1: Photograph of test WBM.

モニターは、全長 100mm、内径 38mm の胴体に SMA フィードスルーを胴体内壁面から中心に向かって 1mm

* tsuyoshi.suwada@kek.jp

突き刺した構造をしている。試験用なのでフランジは無い。Table 1 に機械寸法に関する諸元を示す。

Table 1: Mechanical Design Parameters of WBM Body and Feedthrough Electrode

Parameters	Symbol	Length [mm]
WBM		
Total length	l	100
Aperture diameter	$2a$	38
Feedthrough		
Total length	s	24.8
Protruding length	h	1
Inner diameter	$2b_i$	0.92
Outer diameter	$2a_i$	4.13
Axial location 1	d_1	26.5
Axial location 2	d_2	73.5

モニター構造の特徴として、4つの SMA 端子を 90 度ごとに上下左右配置することにより BPM として動作すること、4つの信号の強度和を取れば電荷モニターとして動作することである。そして単純な電極構造がバンチの時間領域計測を可能にする。ここで注意したいことは、SMA 端子の信号入力部は 50Ω としているが、先端部はビームから見て 50Ω に整合していないことである。ここでは詳細を議論しないが、これはモニター上流の加速管で発生するウェーク場の信号検出を抑制するためである [4]。このことによりバンチ信号も同様に抑制されるが、ウェーク場に対する検出信号強度比が最大になるようにこの突出長さが決められたことに注意しておく。

3. 信号伝送の特性解析

3.1 信号計測システム

Figure 1 に示すようにビーム信号は SMA 端子から引き出され、同軸ケーブル (~15 m) を通して広帯域オシロスコープに入力し波形計測が行われる [3]。波形歪みを誘発するあらゆる要因を補正する必要があるが、本オシロスコープには波形歪みを補正する機能が搭載されている。VNA で計測した周波数領域のデータをあらかじめロードしておく、時間領域の信号波形が FFT(内臓)により周波数領域に変換され、VNA データと積を取った後、今度は時間領域への逆 FFT により補正された信号波形を再現することができる。一連の補正はソフトウェアで行われる。例えば、本モニターで利用する同軸ケーブルによる信号強度の損失は 10 GHz で 30 dB にも達する。このような大きな損失を避けることは困難であるがこの機能を使えば比較的簡単に波形補正ができ、しかもリアルタイムで、元波形と同時に補正波形を表示してくれる。

フィードスルーの周波数特性は、縦方向計測においては周波数補正を余り気にする必要はない。しかし、ビーム電荷量や位置計測では各端子の周波数損失に起因する相対的なゲインの違いがそのまま計測誤差となるので各端子の高周波損失の補正は必要である。

3.2 電磁誘導による信号の流れ

Figure 2 (a), (b) に WBM の断面図と側面図をそれぞれ示す。電磁誘導を用いた新しい校正法における信号の

流れも同時に示す。

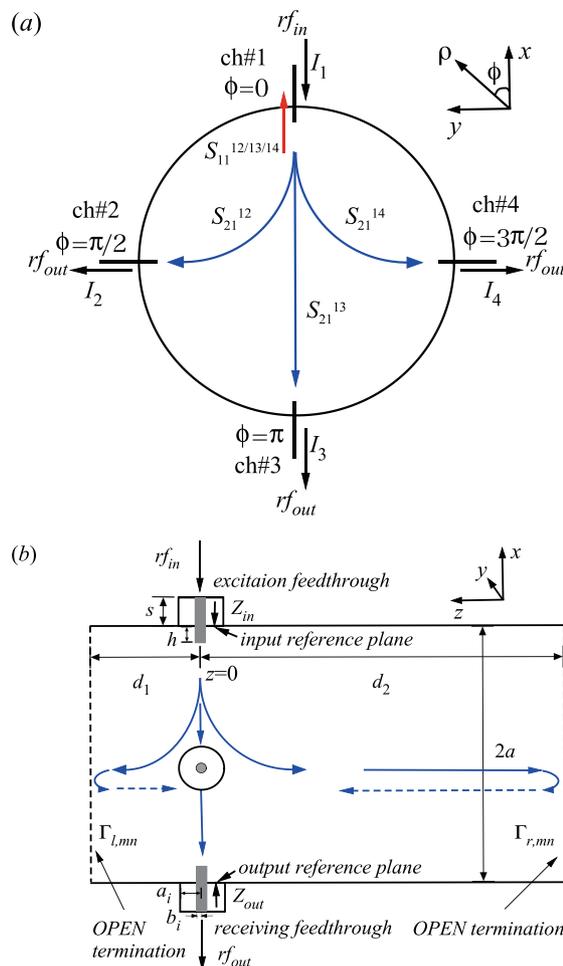


Figure 2: Schematic WBM structures with four feedthrough electrodes in (a) front and (b) side views. The schematics of the signal transmission and propagation in the WBM based on the electromagnetic induction method are also shown. The solid- and dashed-line arrows show the propagation direction of rf waves in transmission to and reflection from the ends of the WBM, respectively.

ある特定の端子 (ch#1) に rf を入力すると先端から rf が励振される。このとき、他電極 (ch#2, #3, #4) には電磁誘導により rf が出力される。VNA を入出力端子に接続すれば困難なく各電極間の結合の強さ (例えば ch#1-#2 間の透過率 S_{21}^{12}) を計測することができる。Figure 2 (a) にこのような電磁誘導による信号の流れを示した。誘導信号の流れは複雑で、断面における流れのみならず側面から見た信号の流れも考察しなければならない。Figure 2 (b) にこの流れを示す。誘導信号は、電極を直接的に誘導するだけでなく、軸方向にも伝送し rf がモニター端面に到達するとその開放端で反射する。反射 rf はさらに他端に到達し再度反射を繰り返す。このような反射波は最終的には定在波を形成し、定在波の一部が端子により検出されることになる。

入力 rf は入力基準面 (Fig. 2 (b) 参照) までは同軸構造により TEM で伝送されるが、基準面に到達すると円筒

構造の固有解である TE 及び TM に変換される (円筒構造内では TEM は伝送されない). この rf が他端子と電磁結合することにより rf が出力される. これが等価回路の考え方である. このような端子間の電磁結合と信号の流れは, Fig. 3 に示す等価回路を用いて厳密に解析することができる [5].

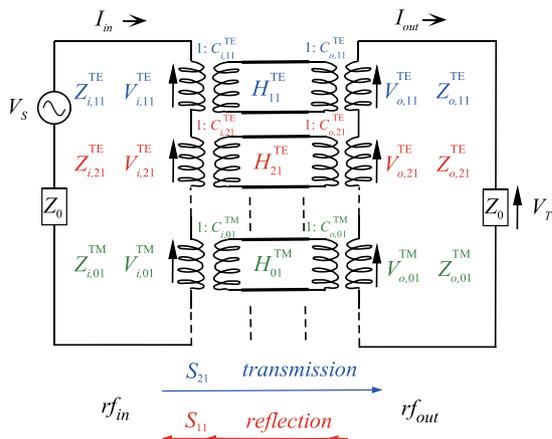


Figure 3: Equivalent circuit model of WBM taking into account electromagnetic couplings between feedthrough electrodes. The couplings for different modes are shown with different colors.

等価回路は左側に励振源 (内部インピーダンス Z_0 、出力 V_S) を配置し、直列接続した個別のインダクタンス (インピーダンス Z_i) を介して rf が伝送路に結合 (伝達関数 H 、結合強度 C_i) する. さらに逆の結合過程を経て rf が出力端子と結合 (結合強度 C_o) し、直列接続したインダクタンス (インピーダンス Z_o) を介して、rf は電位降下 V_T (負荷インピーダンス Z_0) として検出される. このような等価回路は複雑ではあるが、VNA 計測と比較可能な入出力の電圧比 V_T/V_S として解析的に導出できる (文献 [5] に詳細な解析を記載しているので参照してほしい).

Figure 4 に、VNA で計測された ch#1-#2 間及び ch#1-#3 間の透過率 S_{21} の周波数 (10 MHz-13.5 GHz) に対する振幅の変化を示す. ちなみに $S_{21} = 20\text{Log}_{10}(V_T/V_S)$ [dB] 又は $S_{21} = V_T/V_S$ で定義されることに注意しておく.

S_{21} は、周波数に対しログスケールでほぼ単調に増加しているが、幾つかの特徴的なピークが見られる. これは、モニター円筒内に生成される高次 rf (TE_{mn} , TM_{mn} : 下付き mn はモード番号) のカットオフ周波数を示し、実測はこのようなカットオフ周波数の構造を反映したものである. $f < \sim 4$ GHz の領域ではエバネッセント rf が生成されており、端子への結合は小さく計測誤差は大きい. 同定された高次 rf のカットオフを Table 2 にまとめた.

Figure 5 に ch#1-#2 間 ((a), (b)) 及び ch#1-#3 間 ((c), (d)) の透過率 S_{21} の周波数に対する振幅と位相の変化をそれぞれ示す. 図中の赤線は等価回路を用いた解析結果を示す. この解析では最小二乗法により実測値を再現するように高次 rf に対する電極間の結合強度と位相遅れが導出された [5]. 2 GHz 以下の周波数領域ではデータ

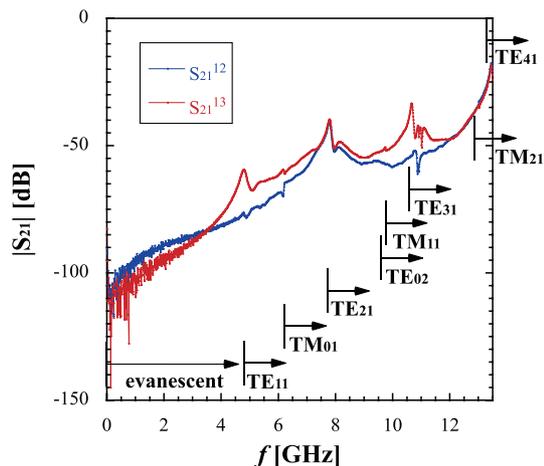


Figure 4: Typical measurement results of amplitude S_{21} between electrodes #1 and #2 (blue) (also #1 and #3 (red)).

Table 2: Cutoff Frequencies for Fundamental and Higher-order TE and TM Modes

Mode	Cutoff [GHz]
TE ₁₁	4.62
TM ₀₁	6.04
TE ₂₁	7.67
TE ₀₂	9.62
TM ₁₁	9.62
TE ₃₁	10.6
TM ₂₁	12.9
TE ₄₁	13.4

のふらつきが顕著である. これらの点は VNA の測定限界に近くノイズフロアで決まるシステム雑音に起因している. 解析はこれらの変動を含んでデータ点をうまく再現していることがわかる. この結果から、電磁誘導による信号の流れが再現できることがわかった. しかしながら、得られた結果を直接的にモニター端子の校正にそのまま応用することはできない. 次節に新しい校正手法を紹介する.

4. 新しい端子校正法

前節では、測定量が例えば S_{21}^{13} (入出力 1 → 3) の場合を議論したが、これを逆にして S_{31}^{13} (入出力 3 → 1) の場合を測定して相関をとれば相対的な端子ゲインの違いを導出することができる. これは、入力 rf の高周波損失は入力端子が支配的で、出力端子での信号損失は結合度が小さいので無視できるからである. Figure 6 (a) に S_{21}^{13} と S_{31}^{13} の振幅に関する相関をプロットした.

相関はほぼ線形と考えられ、傾き 45 度からのずれが相対的な端子ゲインの違いを表すことになる. 測定結果は、特定の周波数領域に関わることなく広帯域に亘り線形相関がほぼ保持されていることがわかる. 最小二乗法による線形フィットを行うと、ch#3 のゲインが ch#1 のゲインに比べ 1.059 ± 0.001 である. このことは ch#1 の損失は ch#3 に比べ大きいことを示しており、これは端子絶縁体損失の個体差を示すと考えられる.

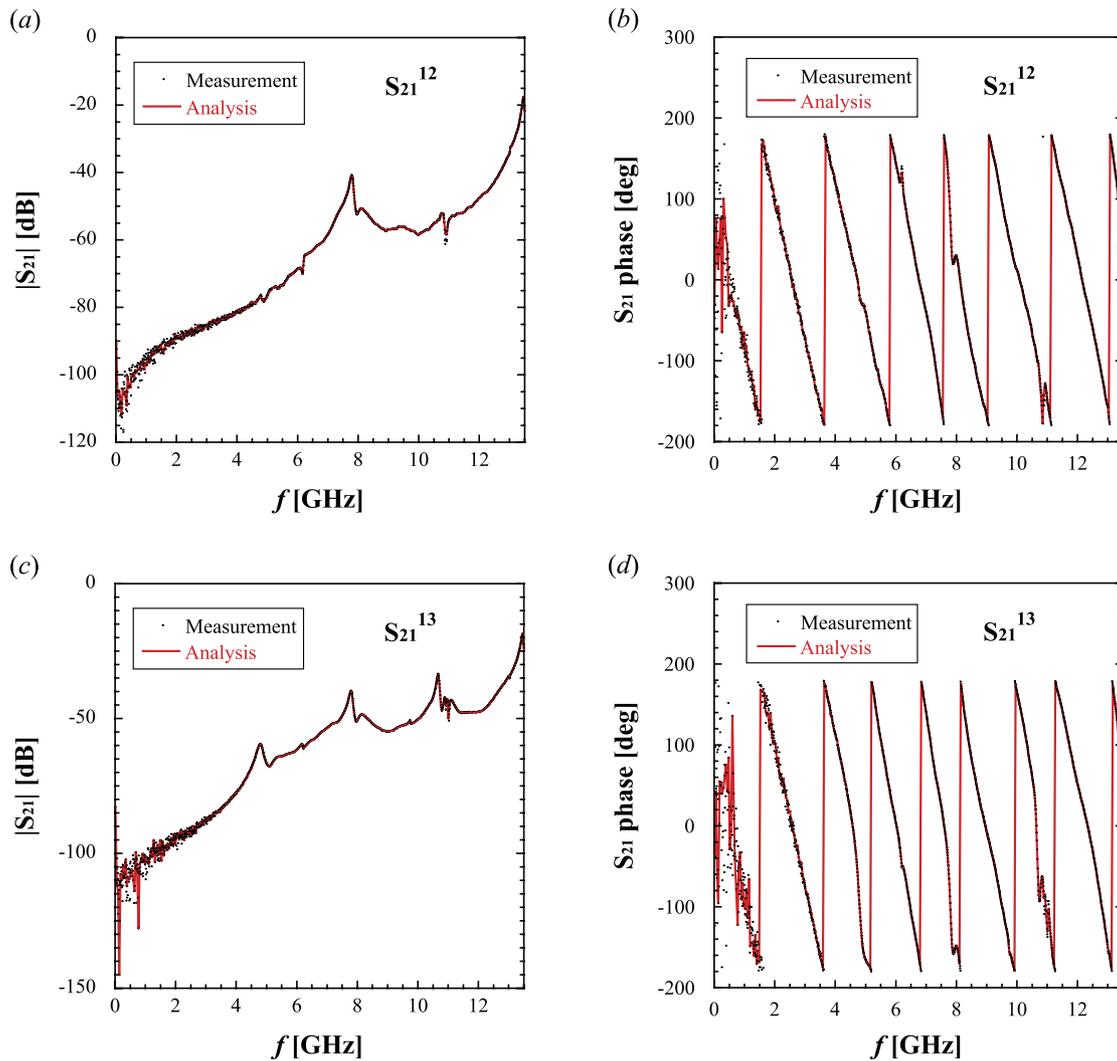


Figure 5: Typical measurement results of amplitude (a) ((c)) and phase (b) ((d)) in S_{21} parameter between electrodes #1 and #2 (#1 and #3).

同様に、 S_{21}^{12} (入出力 1 → 2) と S_{21}^{32} (入出力 3 → 2) の振幅に関する線形相関を Fig. 6 (b) に、 S_{21}^{14} (入出力 1 → 4) と S_{21}^{34} (入出力 3 → 4) の振幅に関する線形相関を同図 (c) にそれぞれ示す. ch#1-#3 に対する補正量が既知なので、この補正量を用いればこの結果から ch#2、ch#4 に対するゲイン補正を個別に行うことができる. 最小二乗法による線形フィットを同様に行うと、ch#2 のゲインが ch#1 に比べ 1.096 ± 0.001 、ch#4 のゲインは ch#1 に比べ 0.938 ± 0.001 であることがわかった. まとめると、ch#1/#2/#3/#4 に対する相対ゲイン補正量は 1, 0.960 ± 0.001 , 1.059 ± 0.001 , 0.938 ± 0.001 であることが示された. 最小二乗法による線形フィットの精度は 0.1% 程度と高い線形性を示していることもわかる. この一連の計測と解析が、電磁誘導を利用した端子ゲインの新しい校正手法である.

5. まとめ

本稿では、入射器 e^+ 捕獲部に導入した広帯域モニターの SMA フィードスルー端子に対する新しい校正手

法を紹介し、信号の流れを電磁結合のモード解析に基づき厳密に解析したところ、等価回路が実測をよく再現することを検証した. この結果、端子ゲインの精度が 0.1% レベルという高精度な校正が可能であることが示された. この校正手法は、今回紹介したフィードスルー型端子のみならず、通常電極など広範なビーム診断装置への応用が可能である.

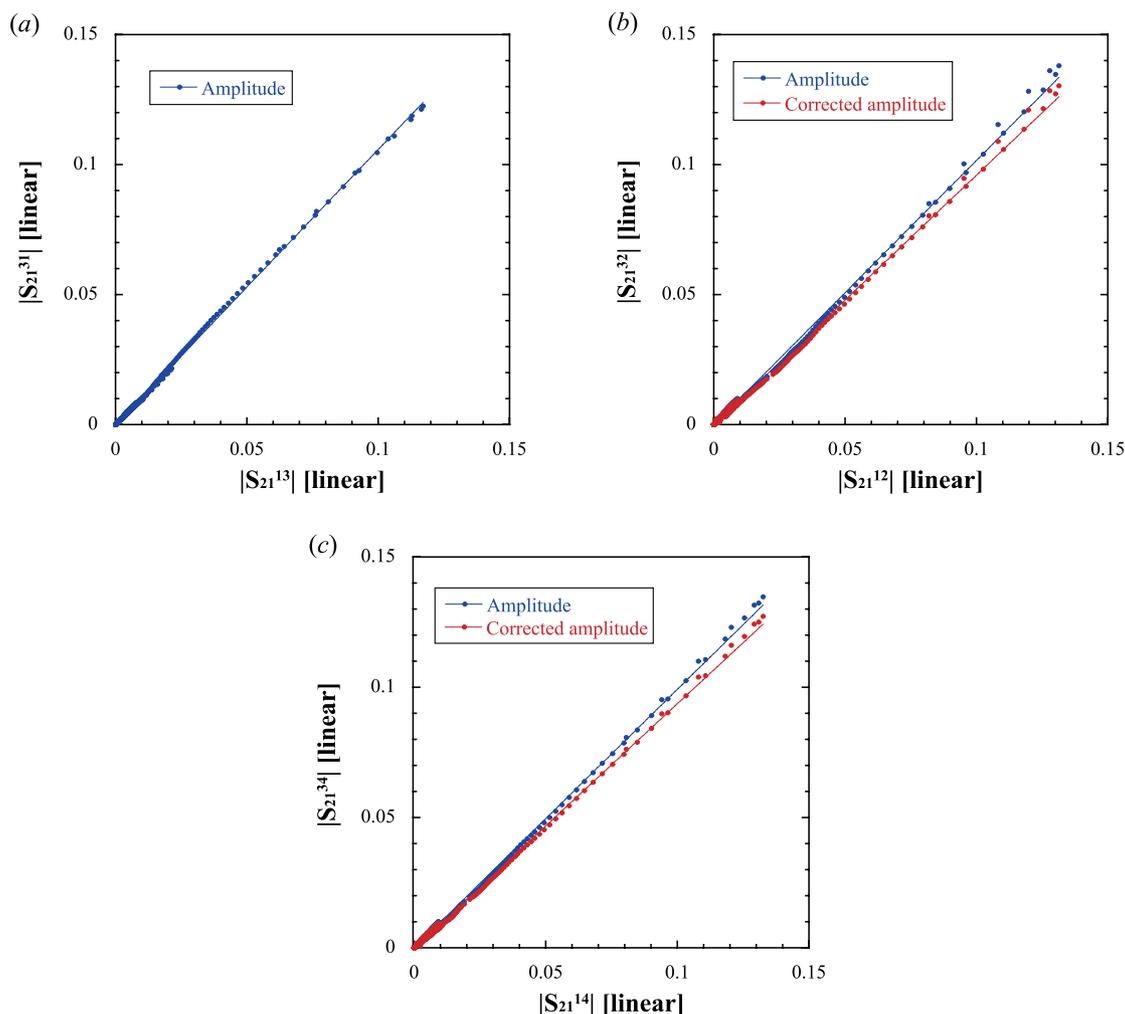


Figure 6: Correlation plots of amplitude (a) between parameters S_{21}^{13} and S_{21}^{31} , (b) between S_{21}^{12} and S_{21}^{32} , and (c) between S_{21}^{14} and S_{21}^{34} .

参考文献

- [1] T. Suwada *et al.*, Sci. Rep. 11, 12751 (2021).
- [2] T. Suwada, "Modal Analysis of Electromagnetic Couplings between a SMA-Feedthrough Electrode and a Beam", Proceedings of the 18th Annual Meeting of PASJ, Kitakyushu, Japan, Aug. 9-11, 2021, pp. 670-674.
- [3] T. Suwada, "Direct observation of positron capture process at the positron source of the KEKB injector linac", Proceedings of the 19th Annual Meeting of PASJ, Kitakyushu, Japan, Aug. 8-11, 2022 (MOPS060).
- [4] M. A. Rehman and T. Suwada, "Observation of Wakefield Effects with Wideband Feedthrough-BPM at the Positron Capture Section of the SuperKEKB Injector Linac", Proceedings of the 10th International Beam Instrumentation Conference (IBIC2021), Pohang, Korea, Sep. 13-16, 2021, pp. 52-55.
- [5] T. Suwada, "Characteristic Analysis of Wideband Beam Monitor with High-Frequency Pickups", Rev. Sci. Instrum. 93, 093301 (2022).