

伝送線共振器ネットワークにおける熱雑音のブロッホスピン表示

兵庫県立大学 大学院 理学研究科, Amazon.com, Inc.^A

石川 潔, B. Patton^A

Bloch spin representation of thermal noise in transmission line resonator networks

University of Hyogo, Amazon.com, Inc.^A

Kiyoshi Ishikawa, Brian Patton^A

両端を接地した同軸ケーブルはラジオ波周波数の共振器になる。実験では、伝送線共振器を結合させたネットワークで発生する熱雑音を測定する。熱雑音は広い周波数領域で生じ、互いに干渉しないので、共振器ネットワークの電気的性質、固有モード、トポロジーを調べるのに有用である。ネットワークの熱雑音モードは、共振器ごとに振幅と位相が異なるので、それらをグラフィカルに表示し、結合共振器系の状態を明示したい。ところで、1次元のスピン相互作用のない n モードタイト・バインディング電子のホッピング伝導 ($c_{i+1}^\dagger c_i + c_i^\dagger c_{i+1}$) は、 n 個の XY スピン系 (相互作用 $s_i^x s_{i+1}^x + s_i^y s_{i+1}^y$) と等価なことが知られている。共振器ネットワークは前者と等価なので、熱雑音は平面内のスピン (ここでは zx 平面内のスピンとする) の列で表すことができる。講演では、雑音モードを3次元に拡張したブロッホベクトルで表し、共振器ネットワークをモード解析する。

直鎖状やリング状に結合させた共振器ネットワークのモード i の固有ベクトルを $v_i = (v_{1i}, \dots, v_{ji}, \dots, v_{mi})$ とすると、共振器 j における振動の振幅は $v_{ji} = v_m \sin K_i X_j$ である (v_m : 規格化定数, K_i : ブリュアンゾーンの波数, $X_j = j$)。ブロッホスピンは $s_{ji} = (\sin K_i X_j, 0, \cos K_i X_j)$ と表され、隣接するスピン間の相互作用 $s_{ji} \cdot s_{j+1i} = \cos K_i$ は一様であり、スピンの向きは振動電圧の位相を表す。図1は、単純なネットワークの電磁モードのブロッホスピン表示である。(a) 共振器3個からなる直鎖, (b) リング, (c) 共振器2個の直鎖, 一方の共振器に損失を加えたときの例外点におけるモードである。隣接するスピンが平行だとエネルギーが低く (波長が長く), 反平行だと高く (短く) なり, 強磁性的にふるまう。直交するスピンが相互作用しないのは, 電磁モードで考えると, 隣接する共振器における振動の位相が直交するので, 隣の共振器を無視して電圧と電流が連続になり, 結合のない独立な共振器の波長に一致するからである。損失に起因する非エルミート性による位相変化は, ブロッホスピンを面外に回転させるとすれば, 観測されたスペクトルを説明できる。

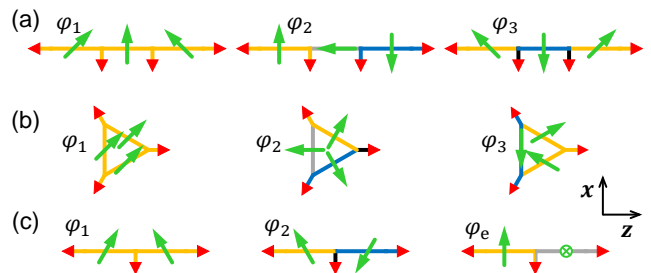


図1. 電磁モードのブロッホスピン表示. (a) 共振器3個の直鎖ネットワーク. (b) 共振器3個のリング. (c) 共振器2個の直鎖 (φ_1, φ_2), 一方の共振器の損失を増やした例外点のモード (φ_e) を示す. zx 平面のブロッホスピン (緑矢印) の x 成分が固有ベクトルの成分 v_{ji} , 傾きが振動の位相を表す. 定在波の正 (オレンジ色) と負 (青色) だけで結合の強さを示すのは難しい.