

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЕЛИЧИНЫ СИГНАЛА В КВАНТОВОМ
МАГНИТОМЕТРЕ САМОГЕНЕРИРУЮЩЕГО ТИПА

Характер поведения сигнала в квантовом магнитометре самогенерирующего типа с достаточно хорошим приближением может быть описан на основе стационарных решений уравнений Блоха для прецессирующей компоненты намагниченности M_x в разомкнутой цепи обратной связи и амплитудно-, фазочастотных характеристик цепи обратной связи.

Степень приближения зависит от неэквидистантности магнитных подуровней рабочего вещества; но при условии, когда ширина линии магнитного резонанса превышает ширину неразрешенной магнитной структуры, это приближение не является ограничением применения решений уравнения Блоха. При разрешенной магнитной структуре атомов рабочего вещества для отдельного перехода решения являются более полными.

В качестве исходного решения для S_{xp} - сигнала на выходе фотодетектора при разомкнутой цепи обратной связи датчик? квантового магнитометра с оптической накачкой воспользуемся выражением (I) на основе работ [1,2] :

$$S_{xp} = \frac{a H_1 \sin^2 \theta \cos \theta \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi + \gamma_1^2 H_1^2 \sqrt{\tau_1 \tau_2} \sin^2 \theta} \sin(\omega t + \varphi),$$

где γ_1 - гиромагнитное отношение для атомов рабочего вещества, H_1 - уровень радиополя; τ_1, τ_2 - эффективные времена релаксации под действием света накачки; $\Delta\omega$ - расстройка относительно частоты резонанса, $\varphi = \operatorname{arctg} \Delta\omega\tau_2$, a - коэффициент пропорциональности. Выражение (I) учитывает; факт, что оптическая накачка пропорциональна $\cos \theta$, где θ - угол между направлениями светового луча и магнитного поля, оптическое детектирование - $\sin \theta$, изменение уровня радио-поля для соленоидной катушки, параллельной световому лучу $\sin \theta$.

Обозначим через $X = \gamma_1 H_1 \sqrt{\tau_1 \tau_2}$.

Тогда после преобразований

$$S_{xp} = \frac{bX \sin^2 \theta \cos \theta \cos \varphi}{1 + X^2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi} \quad (2)$$

где $b = a/\sqrt{\tau_1 \tau_2}$.

Величина уровня радиополя в замкнутой цепи обратной связи, пропорциональная безразмерному параметру X , может быть выражена через комплексную величину сигнала S_{xp} и коэффициент передачи цепи обратной связи $K(j\omega)$, т.е.

$$X = c S_{xp} e^{j\psi} K e^{j\psi},$$

где c - коэффициент пропорциональности.

Условием поддержания генерации является выполнение баланса амплитуд

$$X = c |S_{xp}| |K| \quad (3)$$

на частоте, отвечающей балансу фаз

$$\varphi + \psi = 0 \quad (4)$$

Но с учетом того, что в момент резонанса фазовый сдвиг между X и S_{xp} составляет $\pm \pi/2$ (знак $+$ или $-$ зависит от знака круговой поляризации света накачки и направления тока в катушке обратной связи), выражение (4) принимает более общий вид $\varphi + \psi \pm \pi/2 = 0$.

Если на резонансной частоте баланс фаз не соблюдается, то частота генерации смещается на величину Δf :

$$\Delta f = \pm 2\delta \Delta F/\pi$$

Здесь δ - фазовый набег в рад. кольца обратной связи на резонансной частоте, $\Delta F = 1/\pi\tau_2$ - ширина резонансной линии.

Условие баланса амплитуд для самогенерирующего датчика получим путем подстановки в соотношение (3) значения S_{xp}

$$X = \frac{c b K X \sin^2 \theta \cos \theta \cos \varphi}{1 + X^2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi} \quad (5)$$

Полагая, что K не зависит от амплитуды генерации, т.е. ограничение амплитуды генерации происходит за счет насыщения спиновой системы, и $K' = c b k$, получим

$$1 = \frac{K' \sin^2 \theta \cos \theta \cos \varphi}{1 + x^2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi} \quad (6)$$

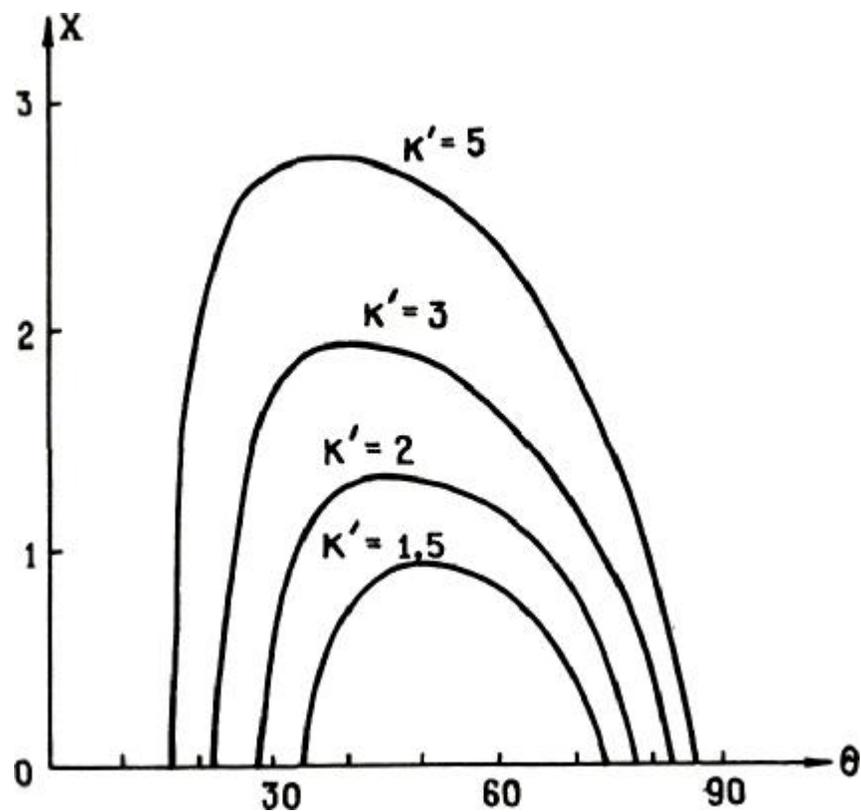


Рис. 1

Из выражения (6) определим значение X:

$$X = \frac{\sqrt{K' \sin^2 \theta \cos \theta \cos \varphi} - 1}{\sin \theta \cos \varphi} \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что генерация возможна только при выполнении неравенства $K' \sin^2 \theta \cos \theta \cos \varphi \geq 1$. При нулевой расстройке $\varphi = 0$ максимальное значение X_0 при заданном θ равно

$$X_0 = \frac{\sqrt{K' \sin^2 \theta \cos \theta} - 1}{\sin \theta}$$

Нормированная кривая резонанса определяется соотношением

$$\frac{X(\varphi)}{X_0} = \frac{\sqrt{K' \sin^2 \theta \cos \theta \cos \varphi} - 1}{\cos \varphi \sqrt{K' \sin^2 \theta \cos \theta} - 1} \quad (8)$$

При заданном K' и θ зона генерации с изменением фазового угла φ определяется неравенством

$$\cos \varphi \geq 1 / K' \sin^2 \theta \cos \theta.$$

Из выражения (7) также следует, что ни при каких значениях K' параметр X не достигает максимума. На рис. 1 представлены зависимости параметра X от угла ориентации θ для различных значений K' при $\delta=0$.

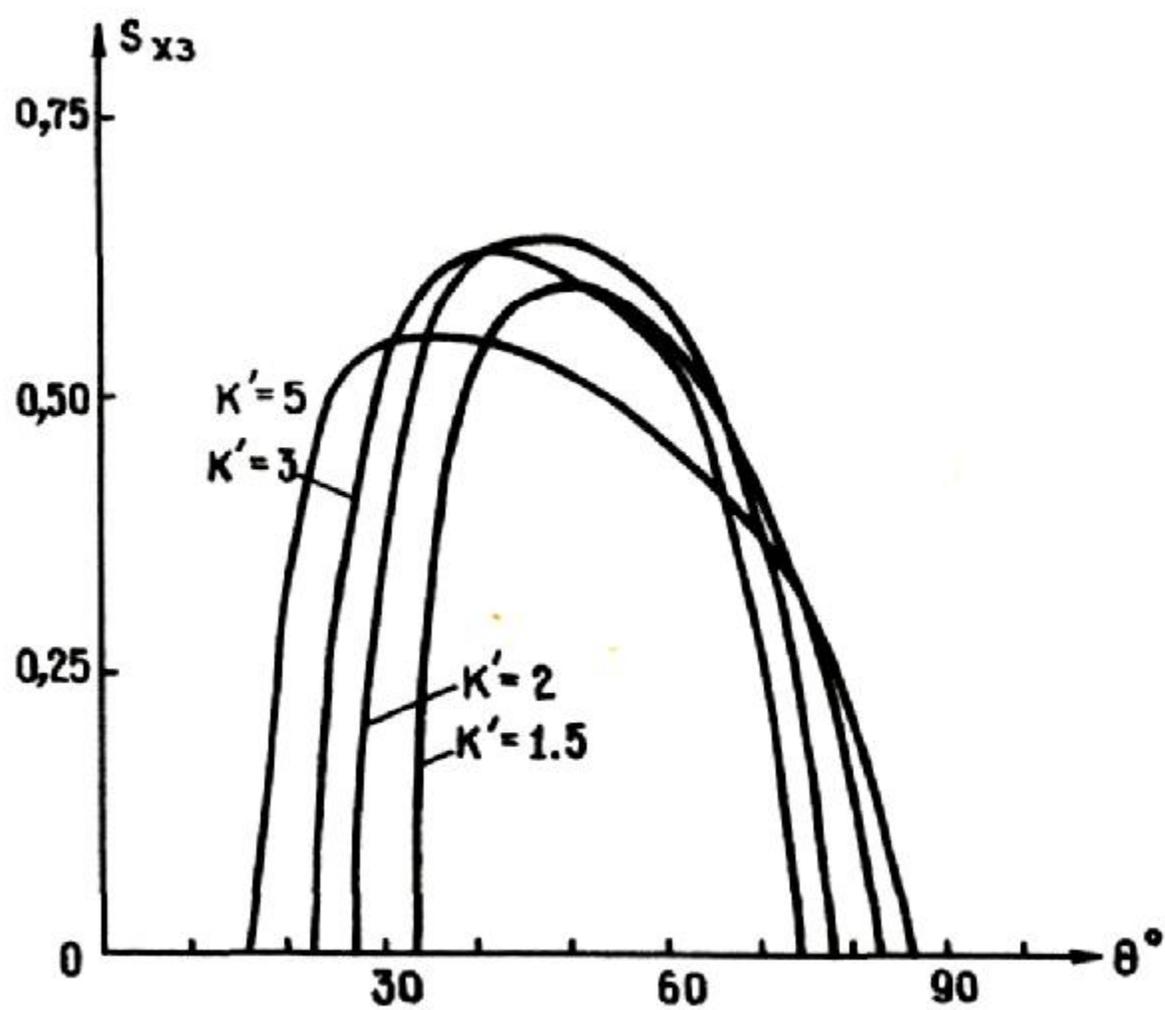


Рис. 2

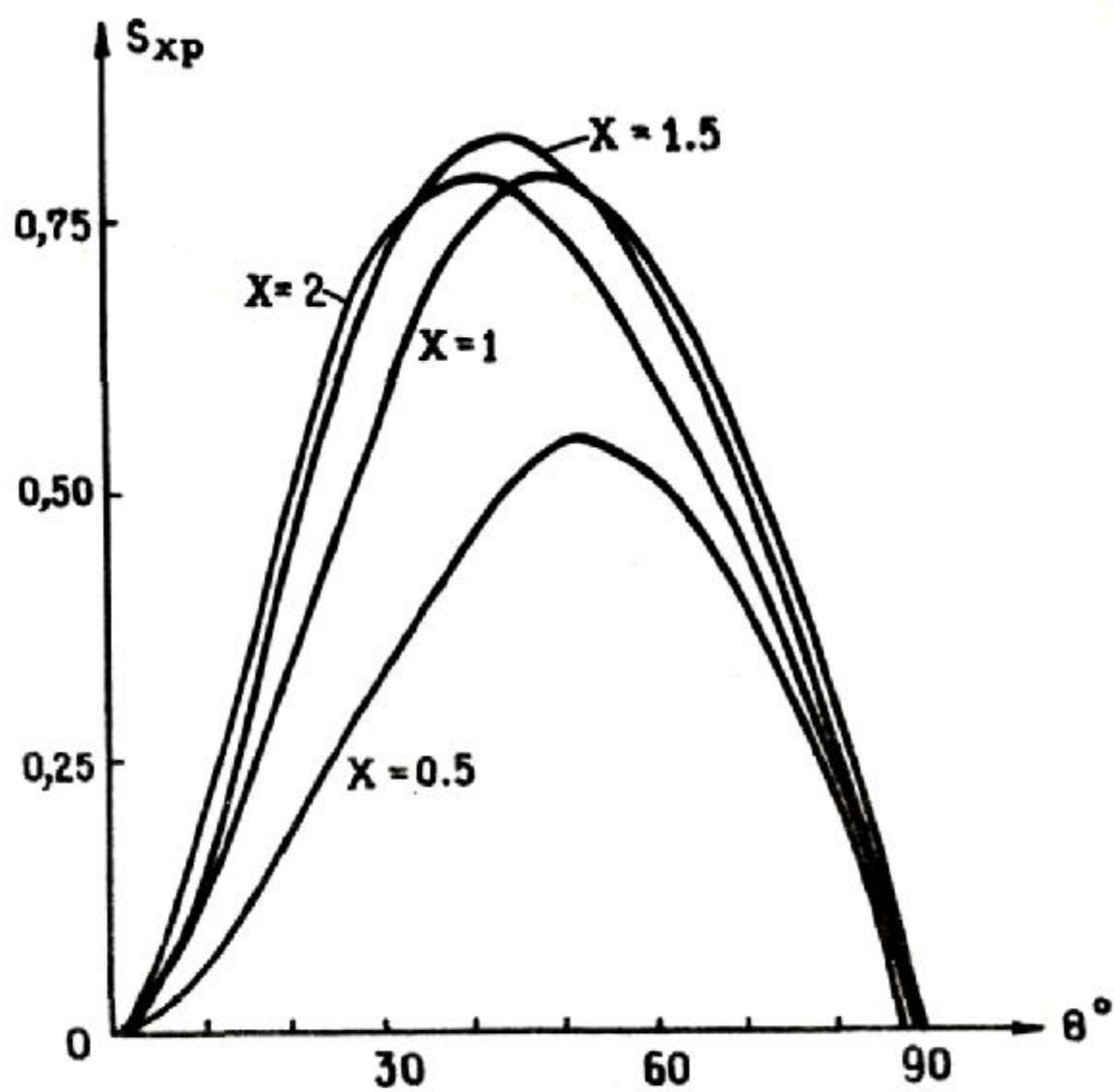


Рис. 3

Ориентационную зависимость сигнала генерации S_{xz} получим, разделив параметр X на K' :

$$S_{xz} = \sqrt{K' \sin^2 \theta \cos \theta - 1} / K' \sin \theta . \quad (9)$$

Эта зависимость в относительном масштабе для различных значений K' представлена на рис. 2. Максимум сигнала в этом случае существует при $K' = 4\sqrt{2}$ и $\theta = 45^\circ$.

Максимальный сигнал для разомкнутой цепи обратной связи существует при $X = \sqrt{2}$ и $\theta = 45^\circ$. Относительные ориентационные зависимости S_{xz} для различных параметров X отображена на рис. 3.

Главный недостаток самогенерирующего датчика с ограничением амплитуды генерации за счет насыщения спиновой системы - появление паразитной модуляции при больших значениях K' [2].

При введении в цепь обратной связи ограничителя амплитуды и высокоэффективной цепи АРУ с резким перегибом амплитудной характеристики ориентационная зависимость сигнала на краях угловой зоны генерации изменяется в соответствии с выражением (9).

При достижении выходного сигнала с изменением θ уровня ограничения значение параметра X остается постоянным, а величина сигнала в цепи, не охваченной цепью АРУ или ограничителем, далее меняется по соотношению (2).

Максимум сигнала S_{xz} при изменении ориентации датчика соответствует углу θ_m и, следовательно, легко определить по рис. 2 или 3 величину действующего параметра K' или X .

Расширение угловой зоны генерации возможно только за счет увеличения K' , а максимальное значение сигнала в пределах зоны генерации существует при определенном значении параметра K' . В свою очередь нахождение оптимального значения X для случая введения ограничителя или цепи АРУ путем изменения параметров выходной цепи влечет за собой изменение K' всей цепи обратной связи и как следствие ширины угловой зоны генерации на фазовое соотношение. Если параметры цепи обратной связи predeterminedены с целью соблюдения баланса фаз в широком частотном диапазоне, то достижение максимальной угловой зоны генерации и максимального сигнала возможно путем изменения уровня ограничения или порогового уровня действия АРУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Bell, A. Bloom. Phys. Rev., 1957, 107, 1559.
2. A. Bloom. Appl. Optics, 1962, 1, N 1, 61.

Из сборника статей «Анализ пространственно - временной структуры геомагнитного поля» М., Наука, 1975, с. 243-247