

УДК 621.396.677

## Использование выступающих элементов для уменьшения взаимной связи вибраторных излучателей антенной решетки

Русов Ю.С.<sup>1,\*</sup>, Курбатский А.С.<sup>1,2</sup>

[\\*rusov.yu.s@gmail.com](mailto:rusov.yu.s@gmail.com)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>АО ЦКБА, Тула, Россия

---

Приведены результаты исследования возможностей уменьшения взаимной связи вибраторных излучателей в плоской периодической антенной решетке. Повышение электрических характеристик излучателей достигается введением в антенную решетку дополнительных выступающих элементов в виде соосных диэлектрических втулок и металлических цилиндров, располагаемых между вибраторными излучателями. На примере фрагмента антенной решетки из одиннадцати элементов показано снижение коэффициента взаимной связи соседних излучателей на 3,9 дБ на средней частоте рабочего диапазона и на 2,8 дБ в полосе частот шириной 6,5%.

**Ключевые слова:** вибраторный излучатель; антенная решетка; взаимная связь излучателей

---

### Введение

Вибраторные излучатели широко применяются в пассивных и активных фазированных антенных решетках (ФАР) [1, 2, 3]. К современным антенным системам нередко предъявляются требования по работе в нескольких частотных диапазонах. В таких системах при относительно небольшом разнесении частотных диапазонов могут использоваться двухдиапазонные вибраторные излучатели [4, 5, 6, 7]. Работу в существенно разнесенных диапазонах обеспечивают специальные широкополосные излучатели [8], но при построении ФАР на их основе возникают проблемы сохранения шага антенной решетки в высокочастотном диапазоне, достаточно малого для требуемого сектора электрического сканирования луча. Другим вариантом построения двухдиапазонной антенной системы со значительным разнесением частотных диапазонов является использование отдельных антенных систем для каждого диапазона. Один из способов реализации такой системы – «совмещенная» ФАР, в которой полотно содержит излучатели двух типов. Например, в верхнем частотном диапазоне могут работать микрополосковые печатные излучатели, расположенные параллельно плоскости раскрыва, а в нижнем частотном диапазоне – объемные вибраторы, экраном для которых является полотно печатных излучателей. В связи

с этим представляет практический интерес исследование объемных вибраторных излучателей, расположенных в периодической антенной решетке над полотном плоских печатных излучателей.

## 1. Постановка задачи

Поскольку к ФАР современных радиолокационных комплексов часто предъявляются требования по обеспечению широкоугольного электрического сканирования луча, при разработке таких антенных систем возникает проблема высокого уровня взаимной связи близко расположенных излучателей [9, 10]. Одним из эффективных путей повышения электрических характеристик ФАР с широкоугольным электрическим сканированием луча является уменьшение взаимной связи излучателей [11]. Известны исследования влияния наклона плеч вибраторного излучателя на взаимную связь между элементами ФАР [12], однако применение только этого способа не обеспечивает достаточного ослабления связи излучателей при широком секторе углов электрического сканирования. Существенного уменьшения коэффициентов взаимной связи излучателей до приемлемых значений можно добиться введением в антенную решетку дополнительных структур [13, 14]. В [15] исследованы различные резонансные структуры, располагаемые между элементами ФАР с печатными вибраторными излучателями. В данной работе поставлена задача исследования возможностей снижения уровня взаимной связи между излучателями ФАР с объемными вибраторами за счет введения в раскрыв антенной решетки выступающих металлических и диэлектрических элементов.

В статье исследованы три вибраторных излучателя: с прямыми плечами, с ломаными плечами и с наклонными плечами. Каждый излучатель рассматривался в составе фрагмента периодической антенной решетки из одиннадцати элементов. Расположение и нумерация излучателей в антенной решетке показаны на рис. 1, где 1...11 – вибраторные излучатели, 12 – дополнительные выступающие элементы.

Шаг решетки выбран равным  $d = 0,54\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве для средней частоты рабочего диапазона  $f_0$ . Такой шаг антенной решетки обеспечивает широкоугольное электрическое сканирование луча.

Между излучателями размещаются выступающие элементы в виде металлических цилиндров и соосных с ними диэлектрических втулок. Внутренний диаметр втулки равен диаметру металлического цилиндра. В качестве материала втулок применен фторопласт. Все излучатели нагружены на питающие линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Записывается центральный излучатель с номером 6. В процессе исследования вычисляются значения  $S_{36}$  и  $S_{56}$  коэффициентов взаимной связи центрального излучателя с номером 6 и ближайших к нему излучателей с номерами 3 и 5 соответственно. Кроме того, проводится расчет коэффициента отражения  $S_{66}$  на входе центрального излучателя.

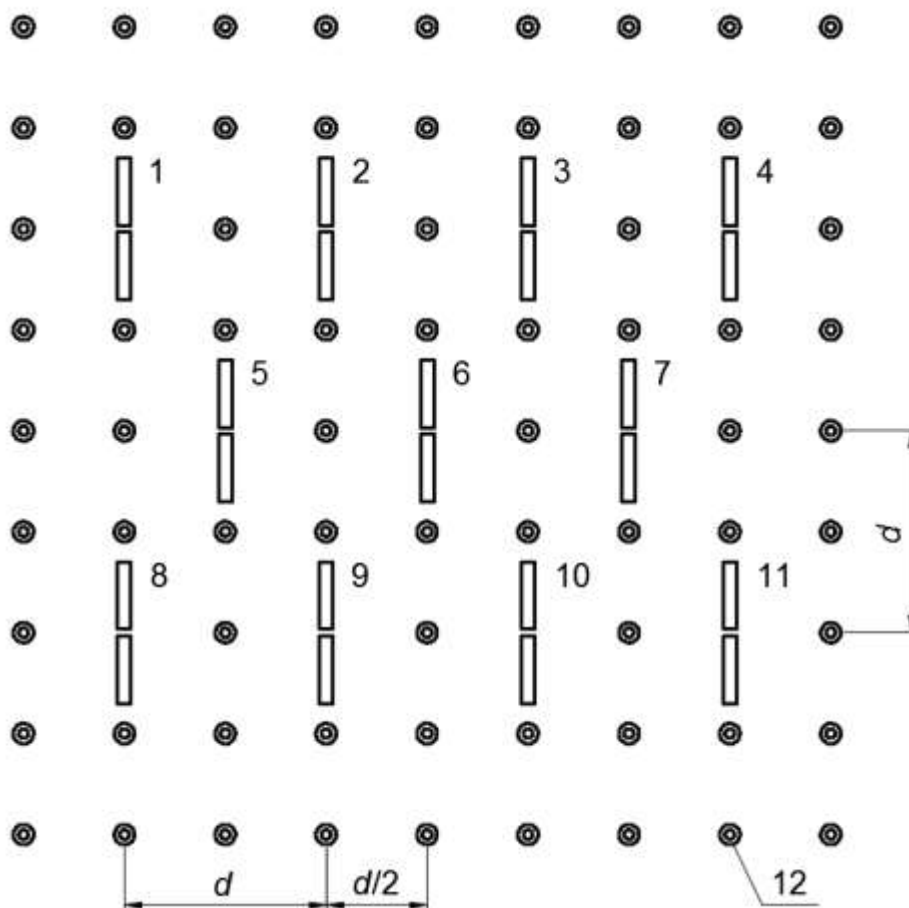


Рис. 1. Исследуемый фрагмент антенной решетки

Для каждого из трех типов излучателя рассматриваются три варианта дополнительных выступающих элементов (12 на рис. 1): диэлектрическая втулка, металлический цилиндр и комбинация металлического цилиндра с диэлектрической втулкой. В последнем случае высоты металлического цилиндра и диэлектрической втулки совпадают.

## 2. Результаты исследований

Расчет электрических характеристик излучателей проведен в программе Ansys Electronics Desktop, которая широко применяется для моделирования электродинамических структур и фазированных антенных решеток [16].

На рис. 2 приведен вибраторный излучатель с прямыми плечами, расположенными параллельно проводящему экрану. Здесь  $h_{и}$  – расстояние от плоскости экрана до точки питания вибратора,  $L_{и}$  – длина одного плеча вибратора,  $D_{и}$  – диаметр плеча вибратора. Для всех рассмотренных в статье вариантов излучателей диаметр плеч взят равным  $D_{и} = 0,03\lambda$ . На рис. 2 также показан комбинированный выступающий элемент, где обозначено:  $D_1$  – внешний диаметр диэлектрической втулки,  $H_1$  – высота диэлектрической втулки,  $D_2$  – внутренний диаметр диэлектрической втулки и диаметр металлического цилиндра,  $H_2$  – высота металлического цилиндра.

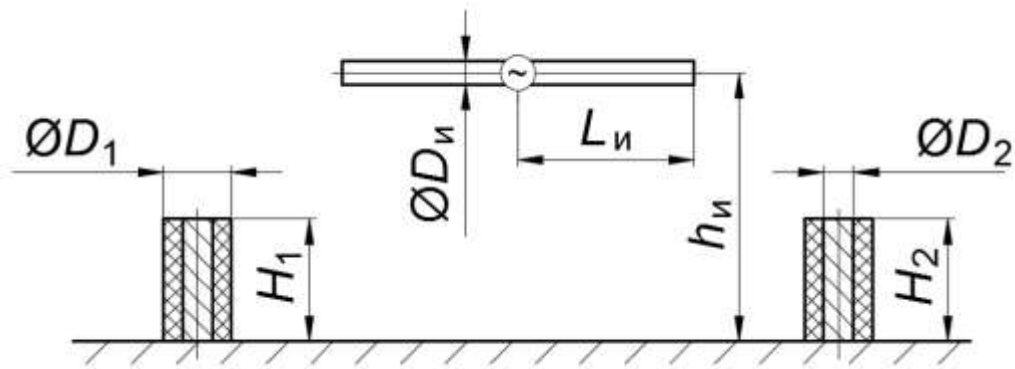


Рис. 2. Вибраторный излучатель с прямыми плечами: 1 – диэлектрическая втулка, 2 – металлический цилиндр, 3 – плечи вибратора

В процессе оптимизации излучателей изменялись геометрические размеры вибраторов и дополнительных выступающих элементов. Важным критерием при этом было получение возможно большего ослабления взаимной связи излучателей в рабочей полосе частот шириной 6,5% при коэффициенте отражения  $S_{66}$  не выше -15 дБ. Полученные в результате оптимизации показанного на рис. 2 излучателя частотные зависимости коэффициентов взаимной связи  $S_{36}$  и  $S_{56}$  и коэффициента отражения  $S_{66}$  представлены на рис. 3, рис. 4 и рис. 5 соответственно.

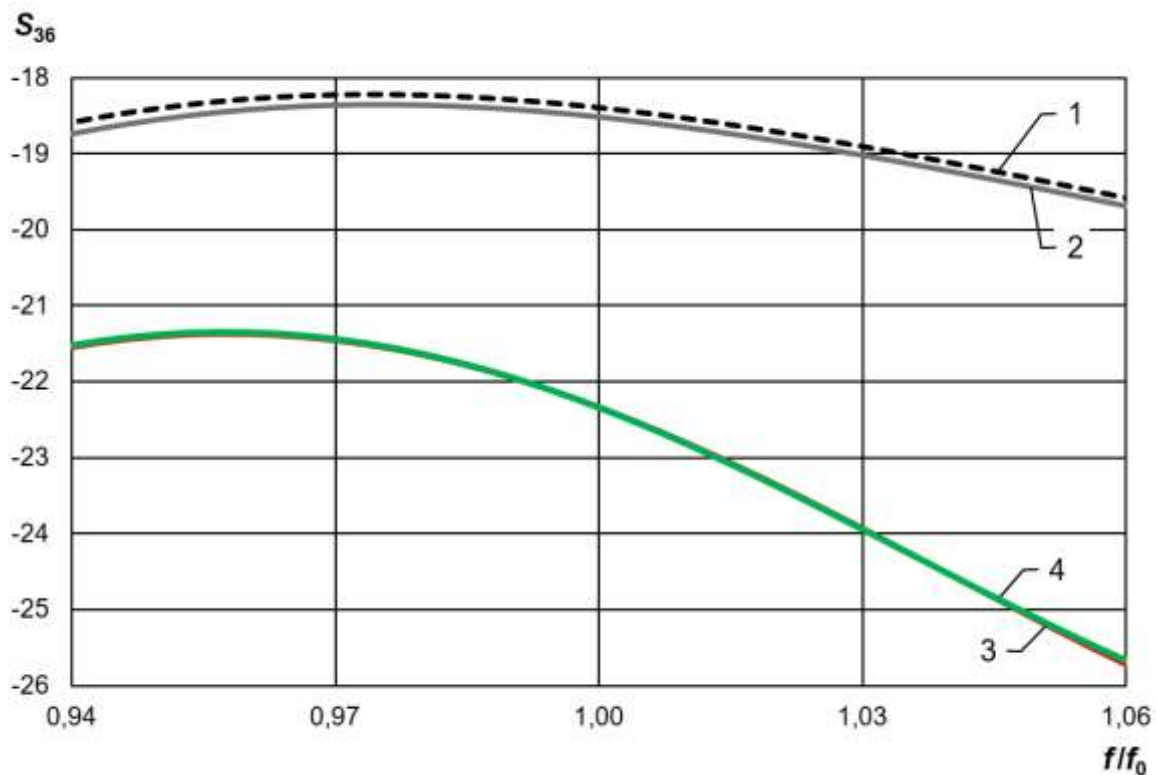


Рис. 3. Значения коэффициента взаимной связи  $S_{36}$  в антенной решетке вибраторных излучателей с прямыми плечами

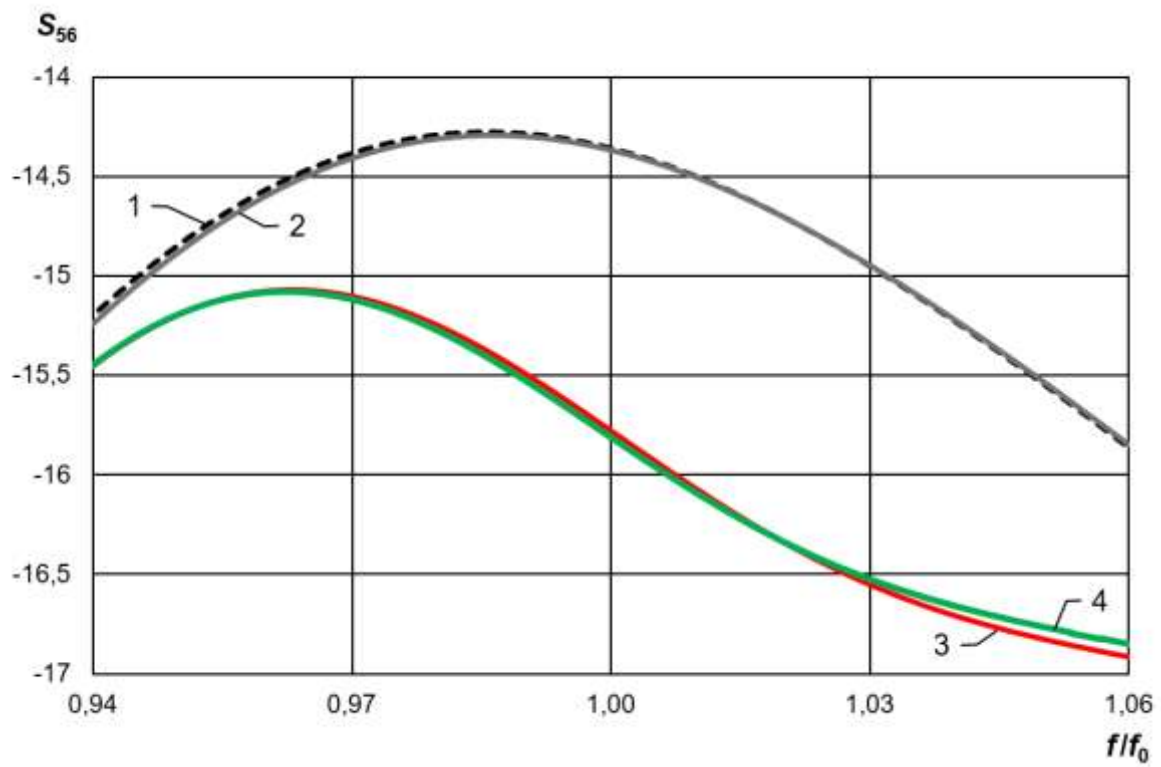


Рис. 4. Значения коэффициента взаимной связи  $S_{56}$  в антенной решетке вибраторных излучателей с прямыми плечами

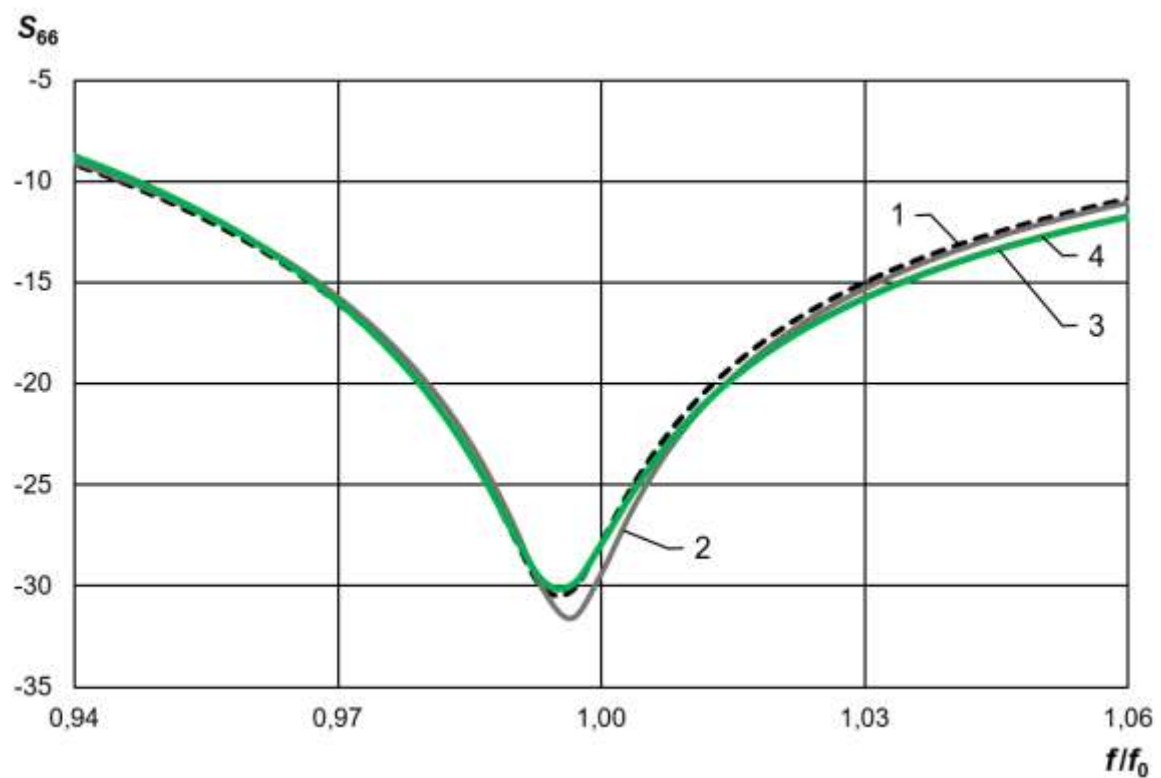
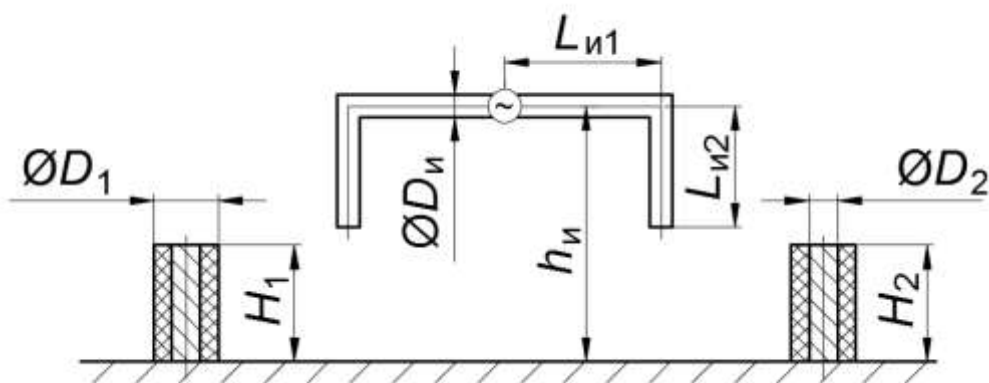


Рис. 5. Значения коэффициента отражения  $S_{66}$  в антенной решетке вибраторных излучателей с прямыми плечами

На рис. 3, рис. 4 и рис. 5 кривые 1 вычислены для излучателя без выступающих элементов при значениях  $h_{и} = 0,2\lambda$  и  $L_{и} = 0,194\lambda$ . Кривые 2 рассчитаны при значениях параметров  $h_{и} = 0,2\lambda$ ,  $L_{и} = 0,194\lambda$ ,  $D_1 = 0,04\lambda$  и  $H_1 = 0,125\lambda$  после введения в антенную решетку только диэлектрических втулок. Кривые 3 получены при добавлении в антенную решетку только металлических цилиндров и соответствуют значениям  $h_{и} = 0,175\lambda$ ,  $L_{и} = 0,19\lambda$ ,  $D_2 = 0,02\lambda$  и  $H_2 = 0,125\lambda$ . Кривые 4 показывают эффект от установки в антенную решетку комбинированных выступающих элементов при параметрах  $h_{и} = 0,175\lambda$ ,  $L_{и} = 0,19\lambda$ ,  $D_1 = 0,04\lambda$ ,  $D_2 = 0,02\lambda$  и  $H_1 = H_2 = 0,115\lambda$ .

На рис. 3 и рис. 4 существенное изменение коэффициентов взаимной связи  $S_{36}$  и  $S_{56}$  наблюдается только после введения металлического цилиндра, что выражается в существенном отличии кривых 3 и 4 от кривых 1 и 2. При этом добавление диэлектрической втулки совместно с металлическим цилиндром практически не изменяет взаимную связь, о чем свидетельствуют лишь незначительные различия в кривых 3 и 4.

На рис. 6 показан вибраторный излучатель с ломаными плечами. Излом плеч вибратора выполнен под углом  $90^\circ$ . На рис. 6 введены обозначения:  $L_{и1}$  – длина части плеча вибратора, параллельной проводящему экрану;  $L_{и2}$  – длина части плеча вибратора, перпендикулярной экрану. Остальные параметры аналогичны представленным на рис. 2.



**Рис. 6.** Вибраторный излучатель с ломаными плечами: 1 – диэлектрическая втулка, 2 – металлический цилиндр, 3 – плечи вибратора

Частотные зависимости коэффициентов взаимной связи  $S_{36}$  и  $S_{56}$  и коэффициента отражения  $S_{66}$ , полученные в результате оптимизации вибраторного излучателя с ломаными плечами, представлены на рис. 7, рис. 8 и рис. 9. Здесь кривые 1 получены для излучателя без выступающих элементов при значениях  $h_{и} = 0,25\lambda$ ,  $L_{и1} = 0,13\lambda$  и  $L_{и2} = 0,082\lambda$ . Кривые 2 вычислены при значениях параметров  $h_{и} = 0,225\lambda$ ,  $L_{и1} = 0,135\lambda$ ,  $L_{и2} = 0,075\lambda$ ,  $D_1 = 0,04\lambda$  и  $H_1 = 0,125\lambda$  при введении в антенную решетку только диэлектрических втулок. Кривые 3 рассчитаны при добавлении в антенную решетку только металлических цилиндров и соответствуют значениям  $h_{и} = 0,2\lambda$ ,  $L_{и1} = 0,13\lambda$ ,  $L_{и2} = 0,078\lambda$ ,  $D_2 = 0,02\lambda$  и  $H_2 = 0,125\lambda$ . Кривые 4 соответствуют введению в антенную решетку комбинированных выступающих элементов и вычислены при параметрах  $h_{и} = 0,175\lambda$ ,  $L_{и1} = 0,13\lambda$ ,  $L_{и2} = 0,078\lambda$ ,  $D_1 = 0,04\lambda$ ,  $D_2 = 0,025\lambda$  и  $H_1 = H_2 = 0,125\lambda$ .

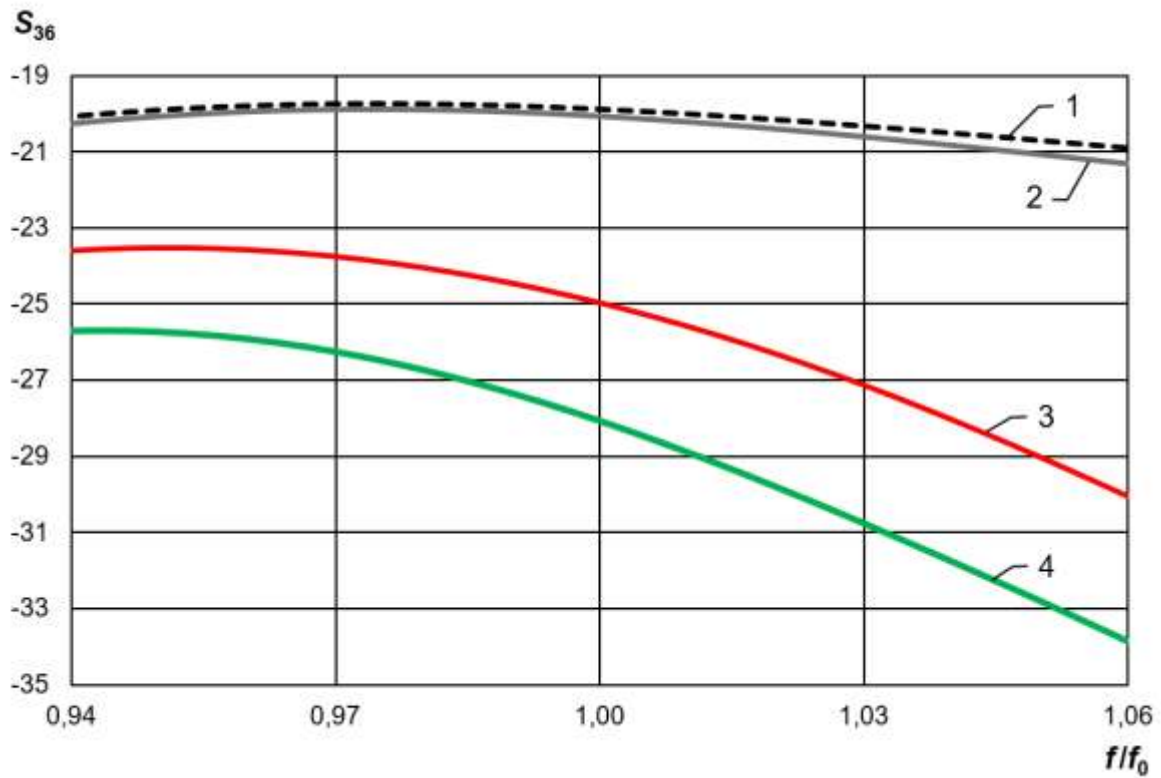


Рис. 7. Значения коэффициента взаимной связи  $S_{36}$  в антенной решетке вибраторных излучателей с ломаными плечами

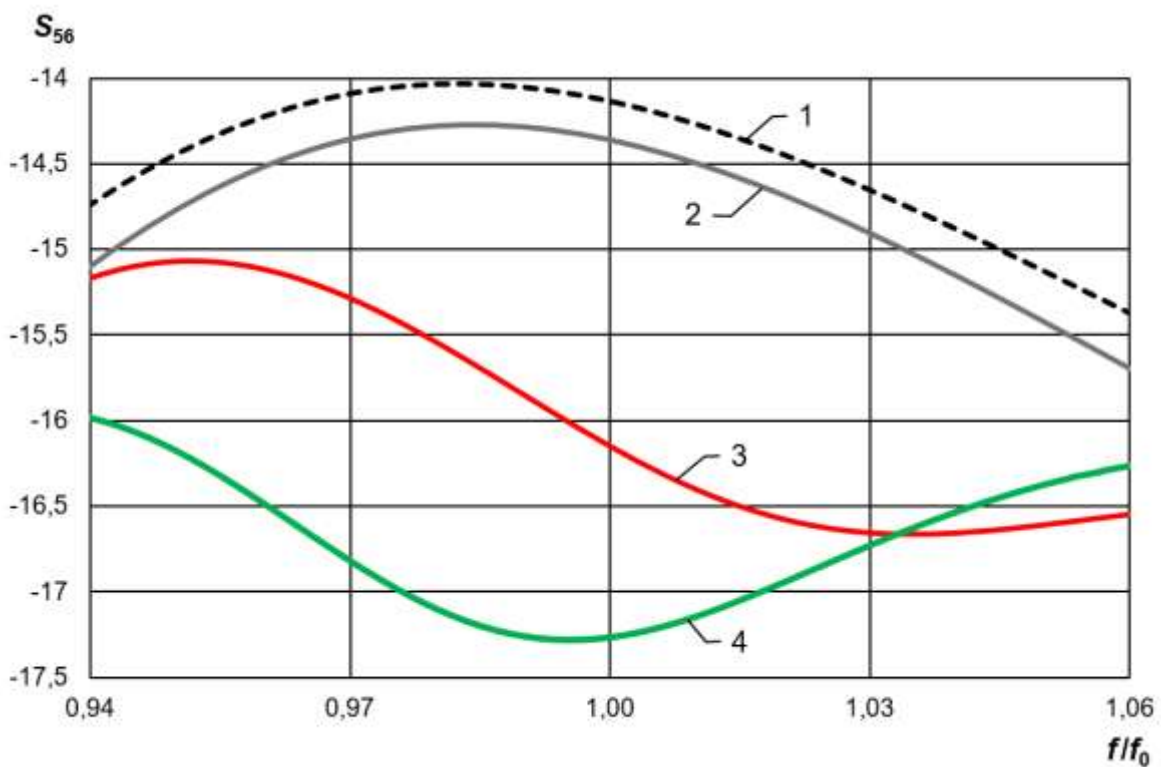
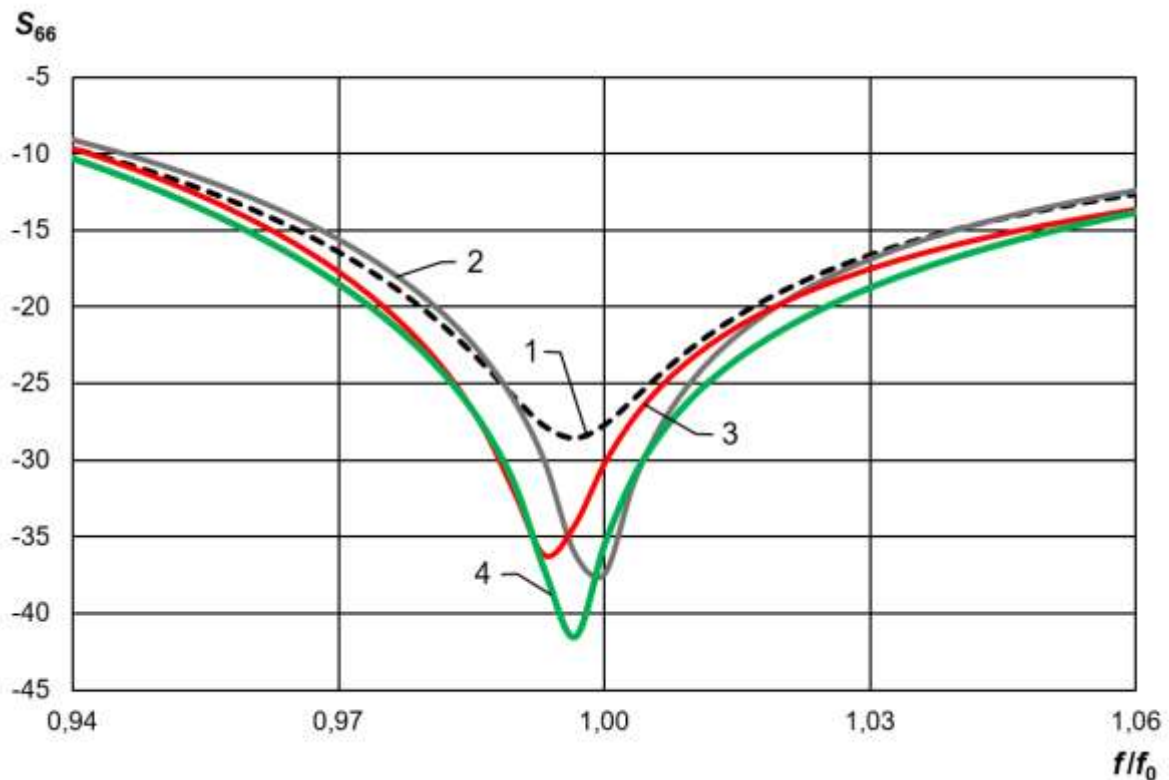


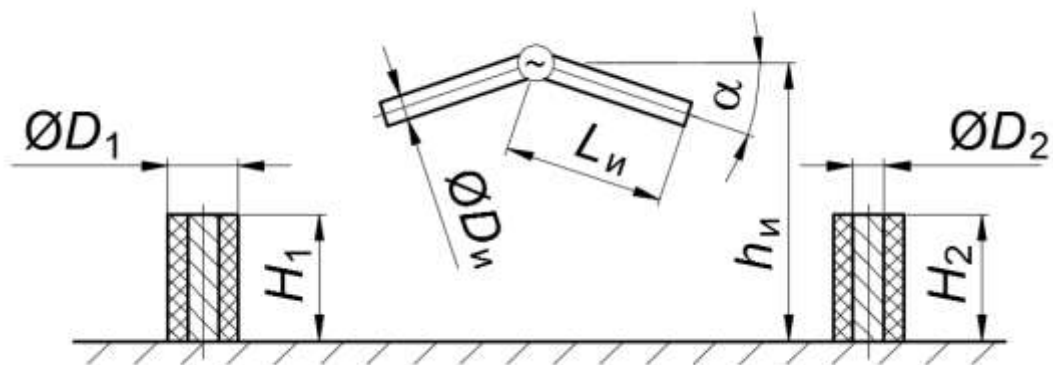
Рис. 8. Значения коэффициента взаимной связи  $S_{56}$  в антенной решетке вибраторных излучателей с ломаными плечами



**Рис. 9.** Значения коэффициента отражения  $S_{66}$  в антенной решетке вибраторных излучателей с ломаными плечами

Результаты показывают, что все три варианта дополнительных выступающих элементов дают эффект снижения взаимной связи. При этом наибольшая эффективность достигается при использовании комбинированных выступающих элементов.

На рис. 10 показан вибраторный излучатель с наклонными плечами. Здесь  $L_{\text{и}}$  – длина одного плеча вибратора,  $\alpha$  – угол между осью плеча вибратора и плоскостью проводящего экрана (угол наклона плеч вибратора). Остальные параметры аналогичны представленным на рис. 2.

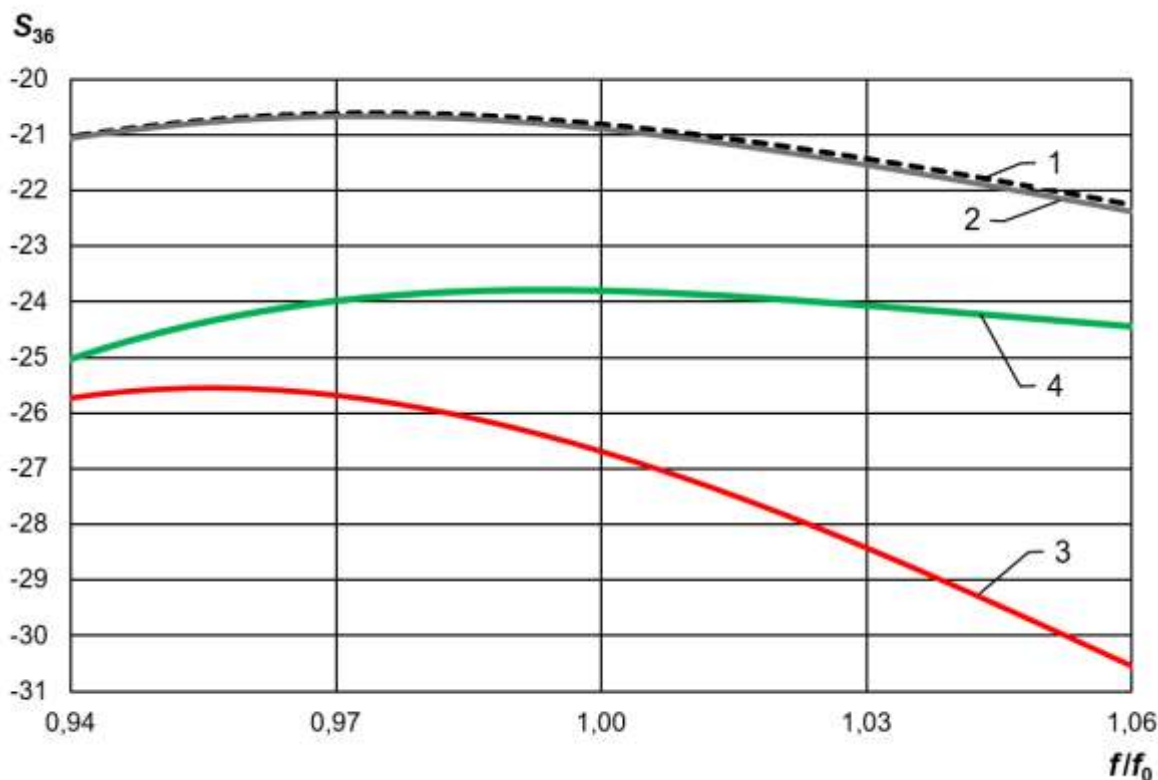


**Рис. 10.** Вибраторный излучатель с наклонными плечами: 1 – диэлектрическая втулка, 2 – металлический цилиндр, 3 – плечи вибратора



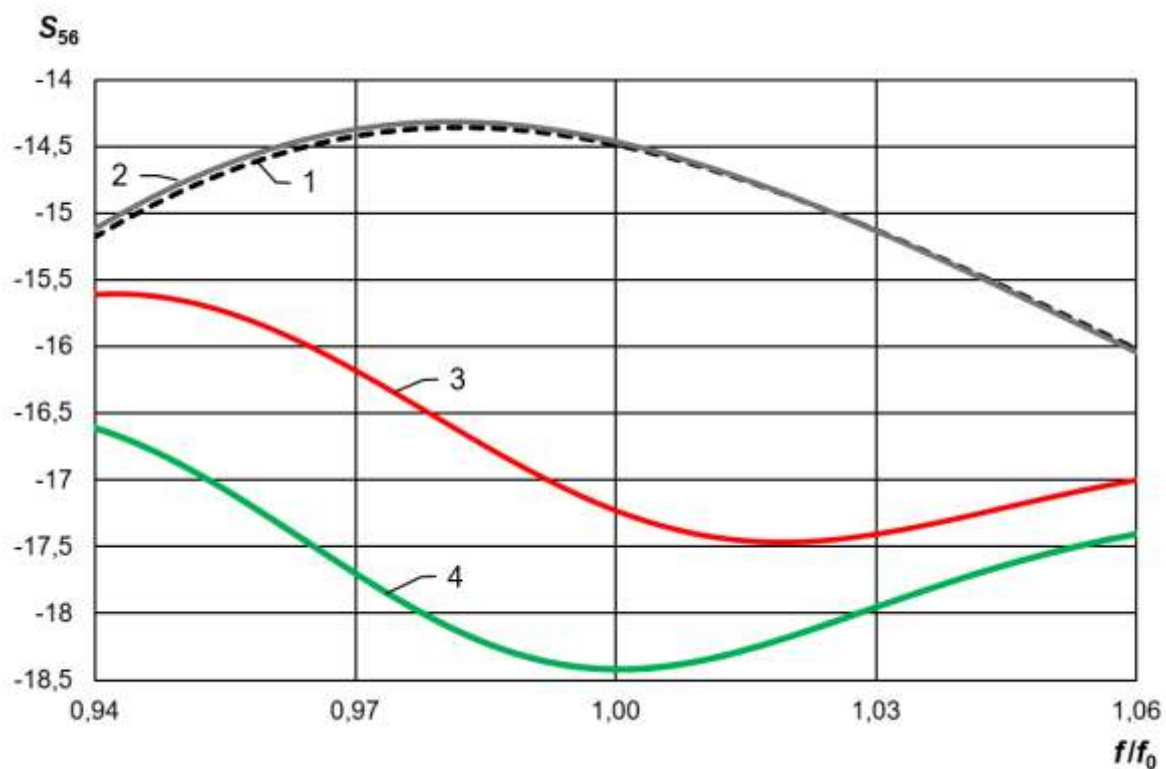
Частотные зависимости коэффициентов взаимной связи  $S_{36}$  и  $S_{56}$  и коэффициента отражения  $S_{66}$ , полученные в результате оптимизации вибраторного излучателя с наклонными плечами, представлены на рис. 11, рис. 12 и рис. 13. Кривые 1 рассчитаны для излучателя без выступающих элементов при значениях  $\alpha = 33^\circ$ ,  $h_{и} = 0,25\lambda$  и  $L_{и} = 0,195\lambda$ . Кривые 2 получены при значениях параметров  $\alpha = 33^\circ$ ,  $h_{и} = 0,25\lambda$ ,  $L_{и} = 0,195\lambda$ ,  $D_1 = 0,04\lambda$  и  $H_1 = 0,05\lambda$  после введения в антенную решетку только диэлектрических втулок. Кривые 3 вычислены при добавлении в антенную решетку только металлических цилиндров и соответствуют значениям  $\alpha = 28^\circ$ ,  $h_{и} = 0,2\lambda$ ,  $L_{и} = 0,187\lambda$ ,  $D_2 = 0,025\lambda$  и  $H_2 = 0,125\lambda$ . Кривые 4 отражают установку в антенную решетку комбинированных выступающих элементов при параметрах  $\alpha = 28^\circ$ ,  $h_{и} = 0,175\lambda$ ,  $L_{и} = 0,192\lambda$ ,  $D_1 = 0,04\lambda$ ,  $D_2 = 0,025\lambda$  и  $H_1 = H_2 = 0,125\lambda$ .

Для излучателей с наклонными плечами увеличение угла  $\alpha$  позволяет более эффективно снизить взаимную связь в антенной решетке, однако приводит к возрастанию коэффициента отражения. При выбранных значениях  $\alpha$  коэффициент отражения  $S_{66}$  не превышает уровня -15 дБ в рабочей полосе частот не менее 6,5% (рис. 13).

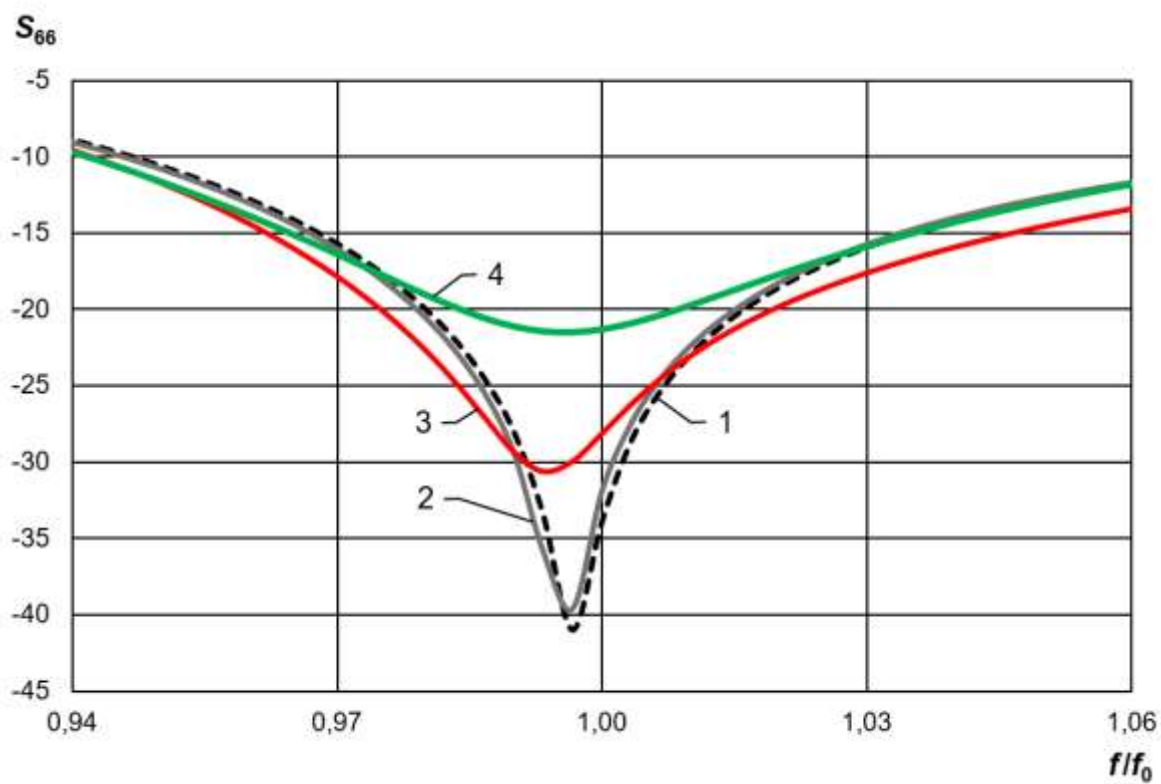


**Рис. 11.** Значения коэффициента взаимной связи  $S_{36}$  в антенной решетке вибраторных излучателей с наклонными плечами

Для вибраторного излучателя с наклонными плечами наибольшее снижение коэффициента взаимной связи  $S_{36}$  достигается при использовании металлических цилиндров, а  $S_{56}$  – при введении в антенную решетку комбинированных выступающих элементов. Использование с этим излучателем только диэлектрической втулки практически не изменяет величины коэффициентов взаимной связи.



**Рис. 12.** Значения коэффициента взаимной связи  $S_{56}$  в антенной решетке вибраторных излучателей с наклонными плечами



**Рис. 13.** Значения коэффициента отражения  $S_{66}$  в антенной решетке вибраторных излучателей с наклонными плечами

Таким образом, при выбранном шаге антенной решетки для всех типов исследованных излучателей удастся ослабить взаимную связь путем введения дополнительных выступающих элементов.

### 3. Обсуждение результатов

Для рассмотренных излучателей при всех вариантах дополнительных выступающих элементов среди коэффициентов взаимной связи  $S_{56}$  является наибольшим. Уменьшение величины именно этого коэффициента позволяет внести наибольший вклад в повышение электрических характеристик излучателей и является определяющим при выборе параметров излучателей.

Введение в антенную решетку излучателей с прямыми плечами только диэлектрических втулок практически не изменяет величин коэффициентов взаимной связи  $S_{36}$  и  $S_{56}$  (рис. 3 и рис. 4). Использование металлических цилиндров и комбинированных элементов дает сравнимый эффект. В связи с этим совместно с излучателями с прямыми плечами целесообразно использовать дополнительные элементы в виде металлических цилиндров.

Применение диэлектрических втулок в антенной решетке излучателей с ломаными плечами снижает взаимную связь излучателей, что в большей степени сказывается на коэффициенте  $S_{56}$  (рис. 8). Более существенное уменьшение коэффициентов  $S_{36}$  и  $S_{56}$  достигается при использовании металлических цилиндров, а максимальный эффект дают комбинированные выступающие элементы (рис. 7 и рис. 8).

Эффект от введения диэлектрических втулок в решетку излучателей с наклонными плечами незначителен (рис. 11 и рис. 12). Заметное ослабление взаимной связи излучателей наблюдается при введении металлических цилиндров и комбинированных элементов. Причем использование металлических цилиндров дает наибольшее снижение коэффициента  $S_{36}$  (рис. 11), а применение комбинированных элементов – наибольшее снижение коэффициента  $S_{56}$  (рис. 12). Таким образом, в антенных решетках вибраторных излучателей с ломаными и наклонными плечами целесообразно использование комбинированных выступающих элементов.

Введение в антенную решетку металлических цилиндров и комбинированных выступающих элементов практически не изменяет характеристику согласования излучателя с прямыми плечами, а диэлектрические втулки позволяют снизить коэффициент отражения в полосе частот (рис. 5). Это позволяет использовать диэлектрические втулки для расширения полосы частот, в которой согласование сохраняется на приемлемом уровне. Для излучателя с ломаными плечами характеристика согласования улучшается вблизи центральной частоты при введении дополнительных выступающих элементов всех типов (рис. 9). Для излучателя с наклонными плечами наблюдается рост значений коэффициента отражения вблизи центральной частоты при введении металлических цилиндров и комбинированных элементов (рис. 13). Ограничение роста коэффициента отражения может достигаться изменением угла наклона плеч вибратора.

## Заключение

Проведенные исследования показали возможность снижения взаимной связи вибраторных излучателей путем введения в антенную решетку выступающих проводящих и диэлектрических элементов, располагаемых в промежутках между излучателями. Установка металлических цилиндров в антенную решетку вибраторных излучателей с прямыми плечами позволяет снизить коэффициенты взаимной связи не менее чем на 1,4 дБ на средней частоте рабочего диапазона и 0,8 дБ в полосе частот шириной 6,5%. Применение комбинированных выступающих элементов в антенной решетке вибраторных излучателей с ломаными плечами снижает коэффициенты взаимной связи на 2,9 дБ на средней частоте и 1,8 дБ в полосе частот шириной 6,5%, а в антенной решетке вибраторных излучателей с наклонными плечами – на 3,9 дБ и 2,8 дБ соответственно.

## Список литературы

1. Батаев В.Я., Демшевский В.В., Цитович А.А., Левашов М.С., Гринев А.Ю., Багно Д.В., Зайкин А.Е., Ильин Е.В. Разработка излучающего полотна АФАР X-диапазона на основе печатного вибраторного излучателя // *Электронная техника*, сер. 1, СВЧ-техника. 2019. Вып. 3 (542). С. 76 – 87.
2. Floch J.-M., Denoual J.-M., Renaudin P. Design of Printed Dipole Array with Reflector // *4<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation 2010 (Barcelona, Spain, April 12 – 16, 2010): Proc.: IEEE, 2010*. Pp. 138 – 141.
3. Lerideau G., Floch J.-M., El Sayed Ahmad A.K., Tarot A.-C., Loison R., Thizon S., Pied S. High Gain Printed Dipole Array with Reflectors and Directors // *2011 11<sup>th</sup> Mediterranean Microwave Symposium: MMS (Yasmine Hammamet, Tunisia, September 8 – 10, 2011): Proc.: IEEE, 2011*. Pp. 61 – 63. DOI: [10.1109/MMS.2011.6068529](https://doi.org/10.1109/MMS.2011.6068529)
4. Valavan S.E., Tran D., Yarovoy A.G. Novel Dual-Band Phased Array Antenna with Low Mutual Coupling Characteristics // *The 8<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation: EuCAP 2014 (The Hague, Netherlands, April 6 – 11, 2014): Proc.: IEEE, 2014*. Pp. 1997 – 2000. DOI: [10.1109/EuCAP.2014.6902197](https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902197)
5. Tarasenko N.V. Printed Dipole Antenna with Stepped-Width Dipoles // *2020 1<sup>st</sup> International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering: PIERE (Novosibirsk, Russia, December 10 – 11, 2020). Proc.: IEEE, 2020*. Pp. 76 – 79. DOI: [10.1109/PIERE51041.2020.9314679](https://doi.org/10.1109/PIERE51041.2020.9314679)
6. Алексейцев С.А., Горбачев А.П., Тарасенко Н.В. Модифицированные печатные двухдиапазонные дипольные излучатели // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2017. № 3. С. 46 – 50.
7. Разумихин А.С., Девятков Г.Н., Лайко К.А., Филимонова Ю.О. Широкополосный излучатель фазированной антенной решетки в печатном исполнении // *Вопросы радиоэлектроники*. 2020. № 10. С. 38 – 45. DOI: [10.21778/2218-5453-2020-10-38-45](https://doi.org/10.21778/2218-5453-2020-10-38-45)

8. Колмыкова А.С., Белоусов О.А., Колмыков Р.Ю., Дякин А.И. Построение сверхширокополосных излучателей с применением интегрированных печатных волноводов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2017. № 4 (66). С. 214 – 220. DOI: [10.17277/voprosy.2017.04.pp.214-220](https://doi.org/10.17277/voprosy.2017.04.pp.214-220)
9. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию. Science Press, 2001. 252 с.
10. Mutual Coupling Between Antennas. Edited by Trevor S. Bird. John Wiley & Sons, Ltd., 2021. 455 p. DOI: [10.1002/9781119565048](https://doi.org/10.1002/9781119565048)
11. Khashimov A.B. Estimation of Mutual Coupling in Finite Array of Dipoles // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2015. Т. 15. № 3. С. 153 – 156. DOI: [10.14529/ctcr150319](https://doi.org/10.14529/ctcr150319)
12. Knott P. Design of a Printed Dipole Antenna Array for a Passive Radar System // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2013. Vol. 2013. Article ID 179296. 6 p. DOI: [10.1155/2013/179296](https://doi.org/10.1155/2013/179296)
13. Vilenskiy A.R., Litun V.I., Lyulyukin K.V. Wideband Beam Steering Antenna Array of Printed Cavity-Backed Elements with Integrated EBG Structure // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2019. Vol. 18. No. 2. Pp. 245 – 249. DOI: [10.1109/LAWP.2018.2888487](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2888487)
14. Сучков А.В., Климов К.Н. Линейная антенная решетка с расширенным рабочим сектором в угломестной плоскости // Антенны. 2013. № 8 (195). С. 18 – 29.
15. Курбатский А.С., Русов Ю.С. Снижение взаимной связи между печатными излучателями антенной решетки // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 163 – 164.
16. Кузнецов И.А., Грибанов А.Н., Курушин А.А., Мосейчук Г.Ф., Синани А.И. Электродинамические расчеты в ANSYS Electronics Desktop под управлением программы, разработанной в MATLAB // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019. № 3. С. 13 – 18. DOI: [10.38013/2542-0542-2019-3-13-18](https://doi.org/10.38013/2542-0542-2019-3-13-18)

## The Use of Protruding Elements to Reduce the Antenna Array Dipole Radiators Mutual Coupling

Yu.S. Rusov<sup>1,\*</sup>, A.S. Kurbatskii<sup>1,2</sup>

[\\*rusov.yu.s@gmail.com](mailto:rusov.yu.s@gmail.com)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Joint Stock Company Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula, Russia

---

**Keywords:** dipole radiator; antenna array; mutual coupling of antenna radiators

---

The research of the possibilities of reducing the mutual coupling between the periodic antenna array dipole radiators by introducing additional protruding elements into the antenna aperture was carried out. Three dipole radiators are considered: straight dipole, bent dipole and angled dipole. Each radiator was studied as part of an antenna array fragment of eleven elements arranged with a distance  $d = 0.54\lambda$ , where  $\lambda$  is the wavelength in free space for the middle frequency of the operating band  $f_0$ . Protruding elements in the form of coaxial metal cylinders and dielectric bushings are placed between the dipole radiators. The inner diameter of the dielectric bushing is equal to the diameter of the metal cylinder. Teflon is used as the bushing material. All radiators are loaded on feed lines with a wave impedance of 50 ohms. Only the central radiator is feeding. In the process of research, the values of the mutual coupling coefficients of the central radiator and the radiators closest to it are calculated. In addition, the reflection coefficient at the input of the central radiator is calculated. For each of the three types of radiator, three options for additional protruding elements are considered: a dielectric bushing, a metal cylinder, and a combination of a metal cylinder with a dielectric bushing. In the process of optimizing the radiators, the geometric dimensions of the dipoles and additional protruding elements were changed. An important criterion was to obtain the greatest possible reduction in the radiators mutual coupling in the operating frequency band with a bandwidth of 6.5% with a reflection coefficient not higher than -15 dB.

The use of only dielectric bushings in the antenna array practically does not change the mutual coupling for all types of radiators. The introduction of metal cylinders and combined elements leads to a much greater reduction of the mutual coupling. In the antenna array of straight dipoles, the use of these two types of protruding elements is equally effective. In the antenna array of bent dipoles and angled dipoles, the combined protruding elements give the maximum effect.

Studies have shown that the installation of metal cylinders in the antenna array of straight dipoles makes it possible to reduce the mutual coupling coefficients by at least 1.4 dB at the middle frequency of the operating band and 0.8 dB in a frequency band with a width of 6.5%. The use of combined protruding elements in the antenna array of bent dipoles reduces the mutual coupling coefficients by 2.9 dB at the middle frequency and 1.8 dB in the frequency band 6.5% wide, and in the antenna array of angled dipoles – by 3.9 dB and 2.8 dB, respectively.

## References

1. Batayev V.Ya., Demshevsky V.V., Tsitovich A.A., Levashov M.S., Grinev A.Yu., Bagno D.V., Zaikin A.E., Iliin E.V. Design of Printed Dipole Array for X-Band AESA. *Elektronnaya Tekhnika* [Electronic Engineering], series 1, *SVCH-tekhnika* [Microwave Engineering], 2019, iss. 3 (542), pp. 76 – 87 (in Russian).
2. Floc'h J.-M., Denoual J.-M., Renaudin P. Design of Printed Dipole Array with Reflector. *4<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation 2010 (Barcelona, Spain, April 12 – 16, 2010): Proc.: IEEE, 2010*. Pp. 138 – 141.
3. Lerideau G., Floc'h J.-M., El Sayed Ahmad A.K., Tarot A.-C., Loison R., Thizon S., Pied S. High Gain Printed Dipole Array with Reflectors and Directors. *2011 11<sup>th</sup> Mediterranean Microwave Symposium: MMS (Yasmine Hammamet, Tunisia, September 8 – 10, 2011): Proc.: IEEE, 2011*. Pp. 61 – 63. DOI: [10.1109/MMS.2011.6068529](https://doi.org/10.1109/MMS.2011.6068529)
4. Valavan S.E., Tran D., Yarovoy A.G. Novel Dual-Band Phased Array Antenna with Low Mutual Coupling Characteristics. *The 8<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation: EuCAP 2014 (The Hague, Netherlands, April 6 – 11, 2014): Proc.: IEEE, 2014*. Pp. 1997 – 2000. DOI: [10.1109/EuCAP.2014.6902197](https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902197)
5. Tarasenko N.V. Printed Dipole Antenna with Stepped-Width Dipoles. *2020 1<sup>st</sup> International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering: PIERE (Novosibirsk, Russia, December 10 – 11, 2020). Proc.: IEEE, 2020*. Pp. 76 – 79. DOI: [10.1109/PIERE51041.2020.9314679](https://doi.org/10.1109/PIERE51041.2020.9314679)
6. Alekseytsev S.A., Gorbachev A.P., Tarasenko N.V. Modified printed two-band dipole radiators. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antey»* [Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation], 2017, no. 3, pp. 46 – 50 (in Russian).
7. Razumikhin A.S., Devyatkov G.N., Laiko K.A., Filimonova J.O. Printed broadband dipole for phased array antenna. *Voprosy radioelektroniki* [Issues of radio electronics], 2020, no. 10, pp. 38 – 45 (in Russian). DOI: [10.21778/2218-5453-2020-10-38-45](https://doi.org/10.21778/2218-5453-2020-10-38-45)
8. Kolmykova A.S., Belousov O.A., Kolmykov R.Yu., Dyakin A.I. Construction of Ultra-Wideband Emitters Using Integrated Printed Waveguides. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [The journal Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2017, no. 4 (66), pp. 214 – 220 (in Russian). DOI: [10.17277/voprosy.2017.04.pp.214-220](https://doi.org/10.17277/voprosy.2017.04.pp.214-220)

9. Vendik O.G., Parnes M.D. *Antenny s elektricheskim skanirovaniem. Vvedenie v teoriyu* [Antennas with electrical scanning. Introduction to Theory]. Science Press, 2001. 252 p. (in Russian).
10. Mutual Coupling Between Antennas. Edited by Trevor S. Bird. John Wiley & Sons, Ltd., 2021. 455 p. DOI: [10.1002/9781119565048](https://doi.org/10.1002/9781119565048)
11. Khashimov A.B. Estimation of Mutual Coupling in Finite Array of Dipoles. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika»* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics], 2015, vol. 15, no. 3, pp. 153 – 156.  
DOI: [10.14529/ctcr150319](https://doi.org/10.14529/ctcr150319)
12. Knott P. Design of a Printed Dipole Antenna Array for a Passive Radar System. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013, vol. 2013, article ID 179296. 6 p.  
DOI: [10.1155/2013/179296](https://doi.org/10.1155/2013/179296)
13. Vilenskiy A.R., Litun V.I., Lyulyukin K.V. Wideband Beam Steering Antenna Array of Printed Cavity-Backed Elements with Integrated EBG Structure. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 245 – 249.  
DOI: [10.1109/LAWP.2018.2888487](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2888487)
14. Suchkov A.V., Klimov K.N. Linear array antenna with a broad operating sector in elevation plane. *Antenny* [Antennas], 2013, vol. 8 (195), pp. 18 – 29 (in Russian).
15. Kurbatskiy A.S., Rusov Yu.S. Snizhenie vzaimnoy svyazi mezhdru pechatnymi izluchatelyami antennoy reshetki [Reduction of mutual coupling between printed antenna array radiators]. *SVCH-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii* [Microwave equipment and telecommunication technologies], 2020, vol. 1-2, pp. 163 – 164 (in Russian).
16. Kuznetsov I.A., Griбанov A.N., Kurushin A.A., Moseychuk G.F., Sinani A.I. Electrodynamic computations using ANSYS Electronics Desktop software controlled by a program developed in the MATLAB environment. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antey»* [Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation], 2019, no. 3, pp. 13 – 18 (in Russian). DOI: [10.38013/2542-0542-2019-3-13-18](https://doi.org/10.38013/2542-0542-2019-3-13-18)