

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ РЕШЕТОК В ОТКРЫТЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

В последние годы в связи с возрастающей загруженностью традиционного радиодиапазона все шире используются беспроводные системы связи оптического диапазона. Увеличение дальности связи и повышение уровня отношения сигнал/шум в точке приема в открытых оптических системах связи, как правило, достигаются за счет применения мощных лазерных источников. При их использовании требуются источники питания с высокими напряжениями и внешние модуляторы. Такие системы достаточно громоздки и дороги. Имеются публикации [1], в которых предлагается использовать в открытых оптических системах связи лазерные и светодиодные решетки на основе недорогих миниатюрных полупроводниковых излучающих элементов. Однако вопросы практического применения лазерных антенных решеток изучены недостаточно [2, 3]. Поэтому исследование возможностей использования лазерных решеток в открытых оптических системах связи является актуальной задачей.

В отличие от антенных решеток радиодиапазона, которые передают сигнал от одного источника, оптические антенные решетки состоят из группы лазерных источников, обладающих определенной степенью когерентности. Обычно для лазерных источников степень когерентности оценивается таким интегральным параметром, как относительная ширина линии излучения $\Delta\lambda/\lambda_0$ (или $\Delta f/f_0$). Для различных типов лазеров этот параметр колеблется в весьма широких пределах: от 10^{-1} (лазеры на жидких средах – растворах красителей) до 10^{-7} (газовые лазеры). Ширина линии излучения $\Delta\lambda$ (или $\Delta\nu$) связана с временем когерентности Δt соотношением $\Delta/\Delta f \geq (4\pi)^{-1}$. Так, если за время когерентности Δt принять длину волнового цуга лазерного излучения на средней частоте ν_0 , то

$$\Delta f \approx (\Delta t)^{-1} \quad (1)$$

представляет ширину области главного максимума спектральной функции (с центром на частоте f_0) на уровне интенсивности $I = 0,4 I_{\max}$.

Результирующее поле в дальней зоне двух идентичных частично когерентных излучателей 1 и 2, расстояние между которыми равно d (рис. 1), при разности хода $\Delta S \ll \Delta l$ (Δl – длина когерентности) и выполнении условия (1) может быть записано в виде

$$I(\theta) \approx 2 I_1(\theta) (1 - (1 - \chi\psi/(2\pi)) \cos\psi), \quad (2)$$

где $I_1(\theta)$ – интенсивность поля одного источника в точке наблюдения; $\chi = \Delta\lambda/\lambda_0$ – относительная ширина линии излучения; $\psi = (2\pi d/\lambda_0) \sin\theta$.

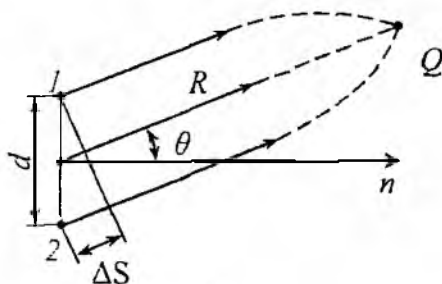


Рис. 1

Рассмотрим характеристики излучения лазерных фазированных решеток из N излучателей. Интенсивность излучения линейной эквидистантной решетки из N идентичных частично когерентных источников может быть найдена способом, описанным для системы двух источников. При этом также полагается, что фазированные излучатели синфазны и излучают импульсы с постоянной амплитудой длительностью Δt , средней частотой ν_0 и периодом повторения $T \gg \Delta t$.

Тогда аналогично формуле (2) получим выражение для интенсивности поля решетки в дальней зоне

$$I(\theta) \approx NI_1(\theta) \left(1 + \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{n_m} (N-n)(1-n\chi\psi)/(2\pi) \cos n\psi\right), \quad (3)$$

где $n_m \leq N-1$

Выражение (3) удобно для расчетов при небольшом числе излучателей. При большом числе излучателей целесообразно преобразовать сумму в формуле (3), представив ее в свернутом виде

$$I(\theta) \approx NI_1(\theta) \left(1 + \frac{2}{N} \sigma\right),$$

где $\sigma = \sum_{n=1}^{n_m} (N-n)(1-n\chi\psi)/(2\pi) \cos n\psi = \sigma_1 - \frac{\chi\psi}{2\pi} \sigma_2$, $\sigma_1 = N\sigma_3 - \sigma_4$, $\sigma_2 = N\sigma_4 - \sigma_5$, $\sigma_3 = \sum_{n=1}^{n_m} \cos n\psi$,

$\sigma_4 = \sum_{n=1}^{n_m} n \cos n\psi$; $\sigma_5 = \sum_{n=1}^{n_m} n^2 \cos n\psi$.

Используя аналитические выражения для конечных сумм $\delta_3, \delta_4, \delta_5$ находим

$$I(\theta) = I_1(\theta) \left(N + 2\sigma_1 - \frac{\chi\psi}{\pi} \sigma_2\right)$$

На рис. 2 приведены нормированные ДН системы излучателей при следующих значениях параметров: $N=4$, χ равна 0,01 (кривая 1), 0,1 (кривая 2); 0,5 (кривая 3) (рис. 2, а) и $N=10$; $\chi=0,01$ (рис. 2, б). В обоих случаях $l/\lambda_0 = 5$, $d/\lambda_0 = 10$.

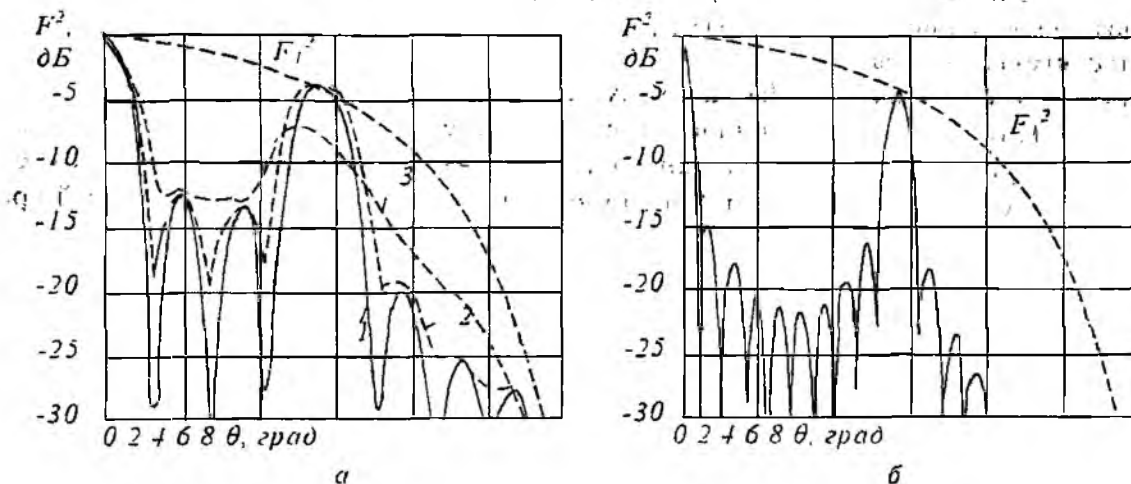


Рис 2

Для линейных фазированных решеток при $N > 2$ очевидно, что частично когерентные излучатели при $\chi \ll 1$ пригодны для создания фазированных решеток, причем их ДН отличается от ДН решеток при $\chi=0$ в основном уровне минимумов, что в большинстве случаев несущественно.

Таким образом, для системы излучателей из частично когерентных оптических источников для приближенных вычислений можно воспользоваться формулами классической теории антенных решеток радиодиапазона.

Нормированная функция направленности антенной решетки из изотропных излучателей имеет вид

$$F_n(n) = \frac{1}{f_{\text{ант}}(n)} \frac{\sin \left[\frac{n}{2} (md \cos n - \psi) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (md \cos n - \psi) \right]} \quad (4)$$

где φ – угол от линии, на которой расположены центры излучателей.

В случае отсчета углов θ от перпендикуляра к линии, на которой расположены центры излучателей, следует в формулах заменить $\cos n$ на $\sin n\theta$.

Если каждый излучатель, входящий в систему, имеет нормированную диаграмму направленности $F_1(\varphi)$, то диаграмма направленности системы из n направленных излучателей определяется произведением

$$F(n) = F_1(n)F_n(n), \quad (5)$$

где $F_n(n)$ – нормированная функция направленности решетки из n ненаправленных излучателей.

В случае многорядной многоэтажной системы из оптических излучателей напряженность поля в удаленной точке приема в направлении перпендикуляра к плоскости, в которой расположены излучатели, увеличится в $n \times m$ раз, где n – число излучателей в ряду, а m – число этажей. Диаграммы направленности системы излучателей в плоскостях перпендикулярных плоскости расположения излучателей определяются по формулам, аналогичным (5), с подстановкой соответствующих функций направленности одиночного излучателя в этой плоскости и соответствующей решетки. На форму диаграммы направленности системы излучателей в рассматриваемой плоскости влияют только размеры системы в данной плоскости.

Применение решетки лазерных излучателей позволит сузить диаграмму направленности системы оптических излучателей, что приведет к увеличению оптической мощности на входе приемника и, соответственно, – к увеличению соотношения сигнал/шум. С помощью приведенных выше формул рассчитаны нормированные диаграммы направленности лазерных решеток. Элемент решетки имеет ширину диаграммы на уровне нулевой мощности $2\theta_0 = 2^\circ$. Исследовалось влияние количества лазеров и расстояния между ними на диаграммы направленности системы лазеров.

На рис. 3, 6 представлены ДН лазерных решеток из лазеров с $2\theta_0 = 2^\circ$, с расстоянием между излучателями $d = 50\lambda$ и количеством излучателей в ряду N от 2 до 20. Увеличение числа лазеров приводит к сужению главного луча ДН, но при этом появляется боковое излучение, возрастающее с увеличением N . Если важным требованием является малый уровень бокового излучения, то при заданных параметрах одиночного лазера и расстоянии $d = 50\lambda$ можно рекомендовать лазерную решетку из двух излучателей.

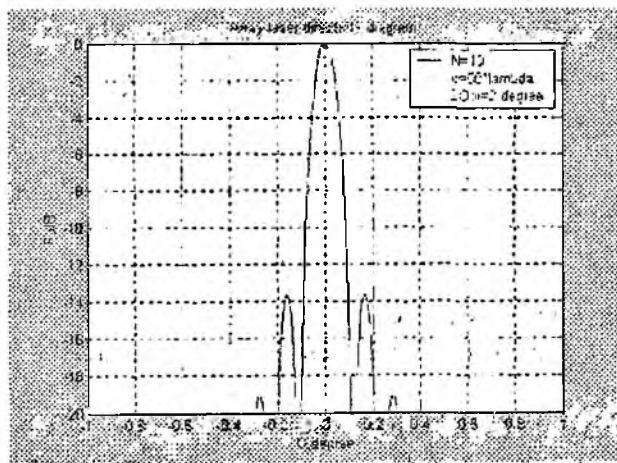


Рис. 3

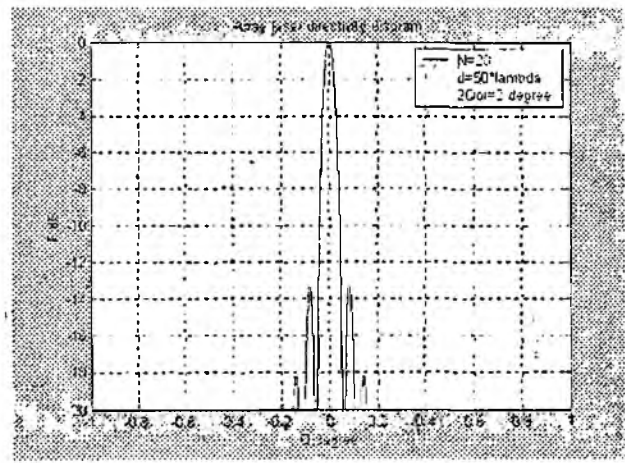


Рис. 4

На рис. 7 – 10 изображены диаграммы направленности решеток из лазеров с $2\theta_0 = 2^\circ$, с количеством излучателей в ряду $N = 10$ и расстоянием между излучателями d от 10 до 300λ . Увеличение расстояния между лазерами приводит к сужению главного луча ДН, однако сопровождается резким возрастанием уровня боковых лепестков и их количества. Ширина главного луча ДН зависит от общих размеров лазерной решетки, поэтому можно получить лучи с одинаковой шириной ДН при фиксированных размерах решетки и различном числе элементов.

в ней (рис 6, 7). Однако применение лазерных решеток в таком случае с большим числом элементов нецелесообразно, так как выигрыш в мощности излучения в направлении максимума излучения сопровождается уменьшением расстояния между лазерами, что практически нереализуемо практически при существующих поперечных размерах лазерных источников

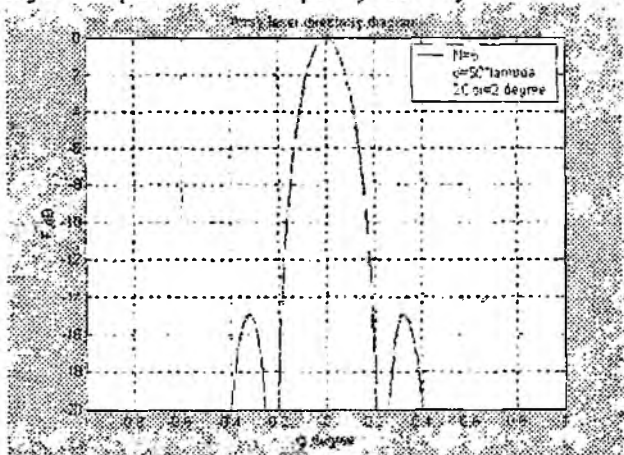


Рис 5

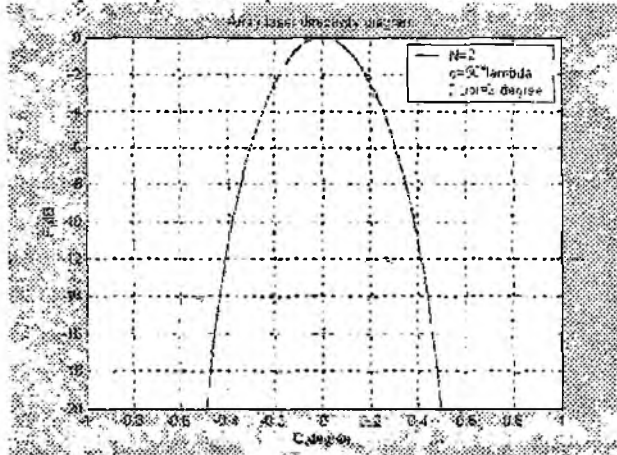


Рис 6

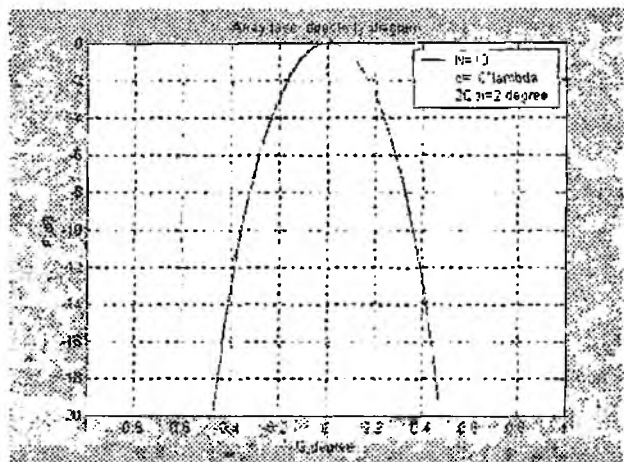


Рис 7

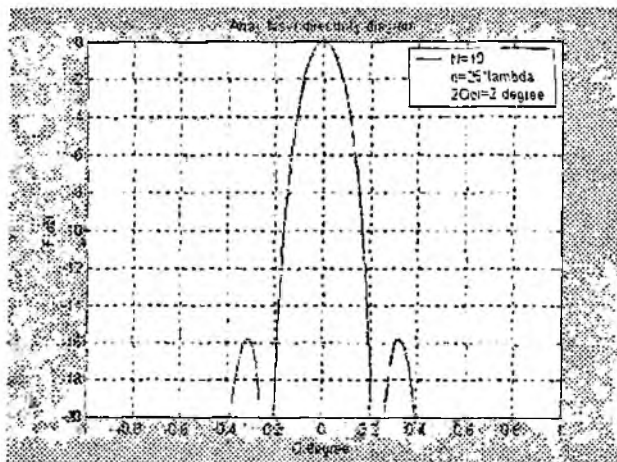


Рис 8

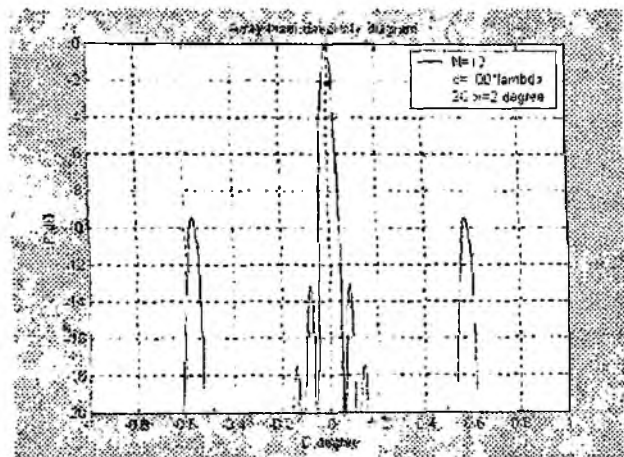


Рис 9

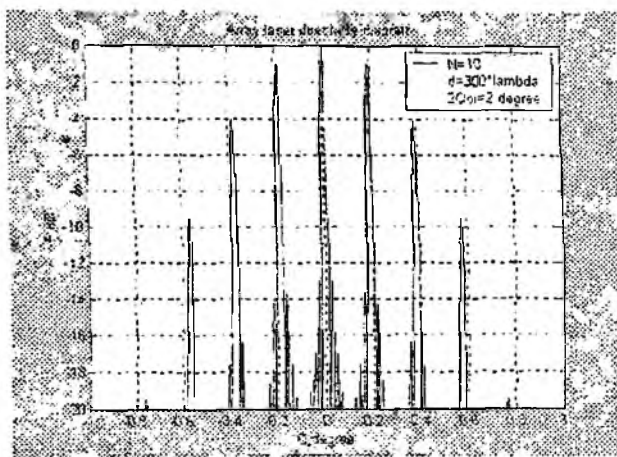


Рис 10

Из анализа всех полученных диаграмм (рис 3 – 10) следует, что сужение диаграммы направленности можно получить, увеличивая число излучателей в решетке. Эффективным способом является также увеличение расстояния между отдельными излучателями в решетке, однако при этом уровень боковых лепестков сильно возрастает. Поэтому следует выбирать ма-

лые расстояния между излучателями при большом числе излучателей. Для оптического диапазона поперечные размеры каждого из излучателей могут составлять тысячи длин волн, и построить лазерную решетку с малыми расстояниями между излучателями невозможно.

Можно предложить следующий способ решения задачи по уменьшению расстояния между излучателями – использовать жгуты из склеенных световодов, поперечные размеры каждого из которых могут быть достаточно малыми (рис 11).

Торец жгута из световодов полируется. Он выполняет роль раскрытия антенной решетки из пучка световодов. На другом конце жгута световоды разводятся в пространстве и подключаются к отдельным оптическим излучателям с помощью стандартных соединителей оптического диапазона.

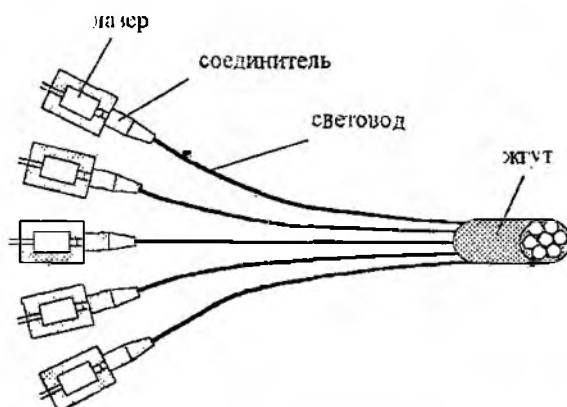


Рис. 11

В качестве элементов оптической антенной решетки целесообразно применять миниатюрные полупроводниковые лазеры, одним из достоинств которых является возможность непосредственной – внутренней модуляции без внешних модуляторов.

Выводы

1. Показано, что для частично когерентных оптических излучателей для приближенных расчетов диаграмм направленности решеток из оптических источников можно использовать расчетные соотношения для антенных решеток радиодиапазона.

2. Для сужения диаграммы направленности лазерной антенной решетки следует увеличивать поперечные размеры решетки.

3. Снижение уровня боковых лепестков диаграммы направленности лазерной решетки можно достичь за счет уменьшения расстояния между излучателями.

4. Предлагается для уменьшения расстояния между оптическими излучателями в решетке при больших поперечных размерах излучателей, из которых строится решетка, использовать для формирования антенной апертуры жгуты из световодов с полированным торцом. Световоды с другой стороны жгута разъединяются на отдельные световоды, расходящиеся в пространстве, и подключаются к оптическим источникам с помощью стандартных разъемов.

Список литературы: 1. Gary A. Shaw, Andrew M. Siegel. *Jouishna Model Ultraviolet comm links for distributed sensor system* // LEOS. oct. 2005. Vol. 19. No 5 p.26-29. 2. Кандидов В. П. Лазерные решетки // Соросовский образовательный журнал. 1999. №12. С. 68-75. 3. Деллидов Д. М., Ивкин А. Н., Кацивец Н. И., Кокин С. В. 100-ваттные лазерные линейки на основе фазированных решеток // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 2. С. 36-41. 4. Гауэр Д. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 00.11.2008